

**BODENCHEMISCHE AUSWERTUNG VON
MELIORATIONSVERSUCHEN IN
KIEFERNBESTÄNDEN (PINUS SILVESTRIS L.)
AUF PHYLLITSTANDORTEN IN DER OBERPFALZ**

**Samuel José Francke Campaña
München 1986**

Bodenchemische Auswertung von Meliorations-
versuchen in Kiefernbeständen (Pinus silvestris L.)
auf Phyllitstandorten in der Oberpfalz

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Forstwissenschaftlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von
Samuel José Francke Campaña

München 1986

Tag der Promotion: 20.02.1987

Berichterstatter: Prof.Dr.K.E.Rehfuess
Prof.Dr.P.Burschel

Gedruckt mit Unterstützung des
Deutschen Akademischen Austauschdienstes

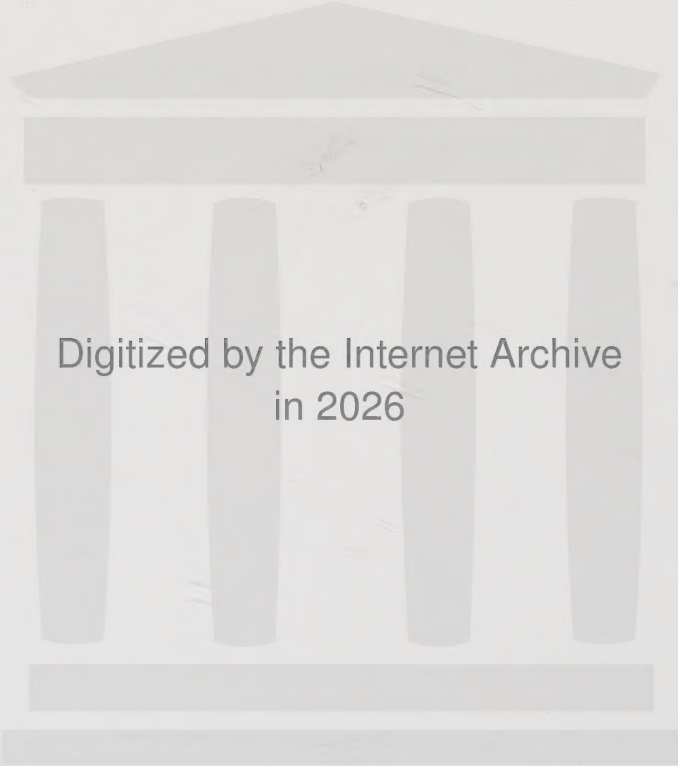


drucken + binden
gmbh
Schellingstraße 23
8000 München 40

Tel. 0 89 / 28 44 45

August

Meiner Frau Christine
und meinem Sohn Erik Rodrigo



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41554624_0011

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde am Lehrstuhl für Bodenkunde der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität München durchgeführt. Allen Mitarbeitern, die zur Anfertigung meiner Arbeit beigetragen haben, möchte ich hiermit meinen herzlichen Dank aussprechen:

Herrn Prof. Dr. REHFUESS, der diese Arbeit leitete, für sein stetiges persönliches Interesse am Fortgang der Arbeit, für die großzügige Unterstützung in entscheidenden Momenten sowie für seine motivierenden Ratschläge. Vor allem bedanke ich mich dafür, daß er mir die Möglichkeit gegeben hat, meine bodenkundlichen Kenntnisse zu vertiefen.

Herrn Dr. MAKESCHIN bin ich ebenfalls zu Dank verpflichtet für seine Unterstützung bei der Geländearbeit und seine wertvollen Anregungen bei der Durchführung der Analysen sowie für seine freundliche Hilfsbereitschaft.

Großen Dank schulde ich auch Herrn Dr. ZENKE, der an der Erstellung des Grundkonzepts der statistischen Auswertung am Computer beteiligt war und mir seine notwendige Hilfe und sein Engagement bei allen Problemen entgegenbrachte.

Mein besonderer Dank gilt Frau Dr. ALCUBILLA, die mir bei den chemischen Problemen eine hervorragende Beraterin war und mit hilfreichen Ratschlägen zur Seite stand.

Herrn Prof. Dr. KREUTZER, Herrn Dr. SCHIERL sowie Herrn Dr. RODENKIRCHEN danke ich für ihre vielen wertvollen Hinweise und Anregungen, Herrn Prof. Dr. FRANZ, Dr. PREUHSLER sowie Herrn DÖRR für die freundliche Bereitstellung von Waldwachstumsdaten, Herrn Prof. Dr. HUSS für die großzügige Bereitstellung von Gutachten für den DAAD und seine wertvollen Informationen.

Herr HOLZMÜLLER führte einen Teil der Laboranalysen durch; Herr KAA, Fräulein ANDRIANI und Herr LENGL gaben mir wertvolle Hinweise bei meiner Arbeit im Labor; Frau KERN hat mir im Labor stets hilfreich zur Seite gestanden. Ihnen allen sei herzlichst gedankt.

Herrn SKREBSKY danke ich besonders für die gelungene Anfertigung der graphischen Darstellungen.

Bei Frau PRAUN bedanke ich mich herzlich für ihre freundliche Mit-
hilfe.

Frau RUESCH, Herrn SEIDENSCHWARZ und Frau RUHL danke ich für die
Zusammenstellung von Analysendaten des Anhangs.

Von Herrn VÖLKL, Frau MEIER und Herrn SCHULTE-ÜBBING stammen die
Kennwerte des Gesamtaufschlußverfahrens für drei der vier unter-
suchten Experimente. Sie wurden mir von Herrn Prof. Dr. REHFUESS
zur weiteren Verwendung zur Verfügung gestellt.

Alle nicht Genannten bitte ich um Nachsicht, auch ihnen gilt mein
vollster Dank.

Mein Aufenthalt in der Bundesrepublik wurde mir durch ein Stipen-
dium des Deutschen Akademischen Austauschdienstes ermöglicht. Hier-
bei sei auch Herrn Dr. SCHMIDT und Frau KUTA für ihre freundlichen
Bemühungen herzlichst gedankt.

München, im Dezember 1986

Samuel José Francke Campaña

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
0. <u>Vorwort</u>	
1. <u>Einleitung und Fragestellung</u>	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Fragestellung	3
2. <u>Beschreibung des Untersuchungsgebietes und der Meliorationsversuche</u>	4
2.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes	4
2.1.1 Allgemeine Beschreibung	4
2.1.2 Geologie	4
2.1.3 Böden	5
2.1.4 Klima	6
2.1.5 Waldgeschichte	7
2.1.6 Bodenvegetation	9
2.2 Beschreibung der Meliorationsversuche	9
2.2.1 Versuch WAL 234	9
2.2.1.1 Ziel des Versuches	9
2.2.1.2 Standort und Bestandsmerkmale	9
2.2.1.3 Versuchsanlage und Meliorationsverfahren	10
2.2.2 Versuch WAL 228	12
2.2.2.1 Ziel des Versuches	12
2.2.2.2 Standort und Bestandsmerkmale	12
2.2.2.3 Versuchsanlage und Meliorationsverfahren	13
2.2.3 Versuch Archenohe	15
2.2.3.1 Ziel des Versuches	15
2.2.3.2 Standort und Bestandsmerkmale	15
2.2.3.3 Versuchsanlage und Meliorationsverfahren	16
2.2.4 Versuch Großdick	17
2.2.4.1 Ziel des Versuches	17
2.2.4.2 Standort und Bestandsmerkmale	18
2.2.4.3 Versuchsanlage und Meliorationsverfahren	18
3. <u>Methodik</u>	20
3.1 Bodenuntersuchungen	20

3.1.1	Probenahme im Gelände	20
3.1.1.1	Entnahme der organischen Auflage	20
3.1.1.2	Entnahme der Mineralbodenproben	20
3.1.2	Aufbereitung der Bodenproben	21
3.1.2.1	Trocknen und Sieben	21
3.1.2.2	Wiegen und Mahlen	21
3.1.3	Bestimmung von pH, C_{org} , N_t	21
3.1.3.1	Bestimmung von pH (H_2O), pH ($CaCl_2$) und pH (KCl)	21
3.1.3.2	Kohlenstoffbestimmung	21
3.1.3.3	Stickstoffbestimmung (Gesamt-N) nach KJELDAHL	22
3.1.4	Gesamtaufschlußmethode ($HF/HClO_4$)	22
3.1.4.1	Prinzip der Methode	22
3.1.4.2	Durchführung der Analysen	22
3.1.5	Bestimmung der effektiven Kationenaustauschkapazität nach der Perkulationsmethode (1 M NH_4Cl) und nach der Extraktionsmethode (0,5 M NH_4Cl) ⁴	23
3.1.5.1	Prinzip der Methode	23
3.1.5.2	Bestimmung der effektiven KAK nach der Perkulationsmethode	24
3.1.5.3	Bestimmung der NH_4Cl -extrahierbaren Kationen durch Extraktion und Schüttelextraktion	24
3.1.5.4	Durchführung der Analysen	25
3.1.5.5	Berechnung	26
3.1.6	Bestimmung der Ionenkonzentrationen in der Gleichgewichtsbodenlösung (GBL)	27
3.1.6.1	Prinzip der Methode	27
3.1.6.2	Aufbereitung der Bodenproben	27
3.1.6.3	Durchführung der Analysen	27
3.1.7	Bestimmung der H_2O -extrahierbaren Ionen (2:1-Wasserextrakt)	28
3.1.7.1	Prinzip und Durchführung der Methode	28
3.2	Nadelanalysen	29
3.2.1	Entnahme der Nadelproben	29
3.2.2	Chemische Analytik	29
3.3	Ertragskundliche Untersuchungen	30
3.4	Statistische Auswertung der Daten	30
3.4.1	Angewendete Programme	30
3.4.2	Darstellung der Ergebnisse	31
3.4.3	Abkürzungen in Tabellen und Graphiken	31

4.	<u>Ergebnisse der Voruntersuchungen</u>	33
4.1	Methodische Voruntersuchungen zur Bestimmung der effektiven KAK durch Perkolation und Extraktion	33
4.1.1	Methodische Voruntersuchungen zur Perkulationsmethode	33
4.1.2	Methodische Voruntersuchungen zur Extraktionsmethode	38
4.1.3	Zusammenfassung der methodischen Voruntersuchungen	40
4.1.4	Durchführung der Serienanalysen nach beiden KAK-Methoden	41
4.2	Methodische Voruntersuchungen zur Analyse der Gleichgewichtsbodenlösung (GBL) und des Wassereextrakts (WE)	41
4.2.1	Methodische Voruntersuchungen zur Gewinnung der GBL	41
4.2.2	Methodische Voruntersuchungen zur Gewinnung des 2:1-WE	47
4.2.3	Zusammenfassung der methodischen Voruntersuchungen zur Bestimmung der GBL und des WE	48
4.2.4	Durchführung der GBL-Serienanalysen	49
4.2.5	Durchführung der WE-Serienanalysen	49
5.	<u>Bodenchemische Auswertung des Versuchs WAL 234</u>	50
5.1	Kennwerte der Bodenfestphase	50
5.1.1	pH-Werte	50
5.1.2	Organischer Kohlenstoff	50
5.1.3	Gesamt-Stickstoff und C_{org}/N_t -Verhältnisse	50
5.1.4	Gesamt-Phosphor und C_{org}/P_t -Verhältnisse	51
5.1.5	Gesamtvorräte an Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor	51
5.1.6	Gesamtgehalte und -vorräte an Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium	52
5.1.7	Gesamtgehalte und -vorräte an Mangan, Eisen und Aluminium	55
5.2	Kationenaustauscheigenschaften	55
5.2.1	Vergleich zwischen Perkolaten (1 M NH_4Cl) und Schüttel-extrakten (0,5 M NH_4Cl) zur Bestimmung von austauschbaren Kationen	55
5.2.2	Überprüfung der Meliorationswirkungen auf Kationen-austauschkapazität und Basensättigung	56
5.2.3	Überprüfung der Meliorationswirkungen auf die Ionen-sättigungen mit beiden Methoden der KAK-Bestimmung	56
5.2.4	Molverhältnisse von Ca/Al, Ca/H, Mg/Al und Basen/Säure-Verhältnisse (B/S) am Austauscher	59
5.2.5	Vorräte an austauschbaren Kationen in organischer Auflage und Mineralboden (0-30 cm) nach beiden KAK-Methoden	59

5.3	Kennwerte der Bodenlösung	61
5.3.1	Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der pH-Werte in GBL und WE	61
5.3.2	Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der Aluminium-, Eisen- und Mangan-Konzentrationen in GBL u. WE	61
5.3.3	Zeitliche und vertikale Variation der Calcium-, Magnesium-, Natrium- und Kalium-Konzentrationen in GBL und WE	62
5.3.4	Zeitliche und vertikale Variation der $\text{NH}_4\text{-N}$ - und $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen in GBL und WE	66
5.3.5	Zeitliche und vertikale Variation der Cl- und $\text{SO}_4\text{-S}$ -Konzentrationen in GBL und WE	66
5.3.6	Vergleich der Kationen- und Anionenäquivalentsummen und der prozentualen Anteile der Kationen in der GBL	66
5.3.7	Vergleich der Kationen- und Anionenäquivalentsummen und der prozentualen Anteile der Kationen im WE	67
5.3.8	Molverhältnisse von Ca/Al , Ca/H , Mg/Al und Mg/Ca in der GBL und im 2:1-Wasserextrakt	70
5.4	Zusammenfassende Bewertung der eingesetzten Methoden hinsichtlich ihrer Aussagekraft für Meliorationseffekte im Versuch WAL 234	71
6.	<u>Bodenchemische Auswertung des Versuchs WAL 223</u>	73
6.1	Kennwerte der Bodenfestphase	73
6.1.1	pH-Werte	73
6.1.2	Organischer Kohlenstoff	73
6.1.3	Gesamt-Stickstoff und $\text{C}_{\text{org}}/\text{N}_{\text{t}}$ -Verhältnisse	73
6.1.4	Gesamt-Phosphor und $\text{C}_{\text{org}}/\text{P}_{\text{t}}$ -Verhältnisse	74
6.1.5	Gesamtvorräte an Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor	74
6.1.6	Gesamtgehalte und -vorräte an Calcium, Magnesium und Kalium	74
6.1.7	Gesamtgehalte und -vorräte an Mangan und Aluminium	77
6.2	Kationenaustauschigenschaften	78
6.2.1	Vergleich zwischen Perkolaten (1 M NH_4Cl) und Schüttel-extrakten (0,5 M NH_4Cl) zur Bestimmung von austauschbaren Kationen	78
6.2.2	Überprüfung der Meliorationswirkungen auf Kationen-austauschkapazität und Basensättigung	78
6.2.3	Überprüfung der Meliorationswirkungen auf die Ionen-sättigungen mit beiden Methoden der KAK-Bestimmung	79
6.2.4	Molverhältnisse von Ca/Al , Ca/H , Mg/Al und Basen/Säure-Verhältnisse (B/S) am Austauscher	83
6.2.5	Vorräte an austauschbaren Kationen in organischer Auflage und Mineralboden (0-30 cm) nach beiden KAK-Methoden	83

6.3	Kennwerte der Bodenlösung	83
6.3.1	Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der pH-Werte in GBL und WE	83
6.3.2	Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der Aluminium-, Eisen- und Mangan-Konzentrationen in GBL u. WE	84
6.3.3	Zeitliche und vertikale Variation der Calcium-, Magnesium-, Natrium- und Kalium-Konzentrationen in GBL und WE	85
6.3.4	Zeitliche und vertikale Variation der $\text{NH}_4\text{-N}$ - und $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen in GBL und WE	89
6.3.5	Zeitliche und vertikale Variation der Cl- und $\text{SO}_4\text{-S}$ -Konzentrationen in GBL und WE	89
6.3.6	Vergleich der Kationen- und Anionenäquivalentsummen und der prozentualen Anteile der Kationen in der GBL	89
6.3.7	Vergleich der Kationen- und Anionenäquivalentsummen und der prozentualen Anteile der Kationen im WE	91
6.3.8	Molverhältnisse von Ca/Al , Ca/H , Mg/Al und Mg/Ca in der GBL und im 2:1-Wasserextrakt	94
6.4	Zusammenfassende Bewertung der eingesetzten Methoden hinsichtlich ihrer Aussagekraft für Meliorationseffekte im Versuch WAL 223	94
7.	<u>Bodenchemische Auswertung des Versuchs Archenohe</u>	96
7.1	Kennwerte der Bodenfestphase	96
7.1.1	pH-Werte	96
7.1.2	Organischer Kohlenstoff	96
7.1.3	Gesamt-Stickstoff und $\text{C}_{\text{org}}/\text{N}_{\text{t}}$ -Verhältnisse	96
7.1.4	Gesamt-Phosphor und $\text{C}_{\text{org}}/\text{P}_{\text{t}}$ -Verhältnisse	97
7.1.5	Gesamtvorräte an Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor	97
7.1.6	Gesamtgehalte und -vorräte an Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium	100
7.1.7	Gesamtgehalte und -vorräte an Mangan, Eisen u. Aluminium	100
7.2	Kationenaustauscheigenschaften	100
7.2.1	Vergleich zwischen Perkolaten (1 M NH_4Cl) und Schüttel-extrakten (0,5 M NH_4Cl) zur Bestimmung von austauschbaren Kationen	100
7.2.2	Überprüfung der Meliorationswirkungen auf Kationen-austauschkapazität und Basensättigung	101
7.2.3	Überprüfung der Meliorationswirkungen auf die Ionen-sättigungen mit beiden Methoden der KAK-Bestimmung	101
7.2.4	Molverhältnisse von Ca/Al , Ca/H , Mg/Al und Basen/Säure-Verhältnisse (B/S) am Austauscher	104
7.2.5	Vorräte an austauschbaren Kationen im Mineralboden (0-30 cm) nach beiden KAK-Methoden	104

7.3	Kennwerte der Bodenlösung	105
7.3.1	Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der pH-Werte in GBL und WE	105
7.3.2	Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der Aluminium-, Eisen u. Mangan-Konzentrationen in GBL u. WE	105
7.3.3	Zeitliche und vertikale Variation der Calcium-, Magnesium-, Natrium- und Kalium-Konzentrationen in GBL und WE	106
7.3.4	Zeitliche und vertikale Variation der $\text{NH}_4\text{-N}$ - und $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentrationen in GBL und WE	110
7.3.5	Zeitliche und vertikale Variation der Cl- und $\text{SO}_4\text{-S}$ -Konzentrationen in GBL und WE	110
7.3.6	Vergleich der Kationen- und Anionenäquivalentsummen und der prozentualen Anteile der Kationen in der GBL	110
7.3.7	Vergleich der Kationen- und Anionenäquivalentsummen und der prozentualen Anteile der Kationen im WE	111
7.3.8	Molverhältnisse von Ca/Al , Ca/H , Mg/Al und Mg/Ca in der GBL und im 2:1-Wasserextrakt	114
7.4	Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse aus dem Versuch Archenohe	114
8.	<u>Bodenchemische Auswertung des Versuchs Großdick</u>	117
8.1	Kennwerte der Bodenfestphase	117
8.1.1	pH-Werte	117
8.1.2	Organischer Kohlenstoff	118
8.1.3	Gesamt-Stickstoff und $\text{C}_{\text{org}}/\text{N}_{\text{t}}$ -Verhältnisse	118
8.1.4	Gesamt-Phosphor und $\text{C}_{\text{org}}/\text{P}_{\text{t}}$ -Verhältnisse	120
8.1.5	Gesamtvorräte an Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor	120
8.1.6	Gesamtgehalte und -vorräte an Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium	123
8.1.7	Gesamtgehalte und -vorräte an Mangan, Eisen u. Aluminium	126
8.2	Kationenaustauscheigenschaften	126
8.2.1	Vergleich zwischen Perkolaten (1 M NH_4Cl) und Schüttel-extrakten (0,5 M NH_4Cl) zur Bestimmung von austauschbaren Kationen	126
8.2.2	Überprüfung der Meliorationswirkungen auf Kationenaustauschkapazität und Basensättigung	126
8.2.3	Überprüfung der Meliorationswirkungen auf die Ionensättigungen mit beiden Methoden der KAK-Bestimmung	127
8.2.4	Molverhältnisse von Ca/Al , Ca/H , Mg/Al und Basen/Säure-Verhältnisse (B/S) am Austauscher	131
8.2.5	Vorräte an austauschbaren Kationen in organischer Auflage und Mineralboden (0-30 cm) nach beiden KAK-Methoden	131

8.3	Kennwerte der Bodenlösung (Entnahmetermin Oktober)	131
8.3.1	Vertikalgradient und meliorationsbedingte Veränderung der pH-Werte sowie der Al-, Fe- u. Ca-Konzentrationen	131
8.3.2	Vertikalgradient und meliorationsbedingte Veränderung der Mangan-, Kalium-, Natrium- und Magnesium-Konzentrationen (mg/l) in GBL und WE	133
8.3.3	Vertikalgradient und meliorationsbedingte Veränderung der $\text{NH}_4\text{-N-}$, $\text{NO}_3\text{-N-}$, Cl- und $\text{SO}_4\text{-S-}$ Konzentrationen in GBL und WE	133
8.3.4	Vergleich der Kationen- und Anionenäquivalentsummen und der prozentualen Anteile der Kationen in GBL u. WE	135
8.3.5	Molverhältnisse von Ca/Al, Ca/H, Mg/Al und Mg/Ca in der GBL und im 2:1-Wasserextrakt	135
8.4	Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse aus dem Versuch Großdick	135
9.	<u>Diskriminanzanalytische Überprüfung der boden- und nadelanalytischen Verfahren auf ihre Eignung zur Erfassung von Meliorationswirkungen im Versuch WAL 234</u>	139
9.1	Problemstellung	139
9.2	Prinzip der Diskriminanzanalyse und Prüfverfahren	139
9.3	Beurteilungskriterium für die Ergebnisse	141
9.4	Ergebnisse der schrittweisen Diskriminanzanalyse unter Verwendung der Gesamtelementgehalte im Boden	142
9.5	Ergebnisse der schrittweisen Diskriminanzanalyse unter Verwendung der Kennwerte der effektiven KAK (Perkolationsmethode)	145
9.6	Ergebnisse der schrittweisen Diskriminanzanalyse unter Verwendung der Gehalte an $\text{NH}_4\text{Cl-}$ extrahierbaren Kationen (Schüttelextraktmethode)	148
9.7	Ergebnisse der schrittweisen Diskriminanzanalyse unter Verwendung der Element-Konzentrationen in der GBL	151
9.8	Ergebnisse der schrittweisen Diskriminanzanalyse unter Verwendung der Element-Konzentrationen im 2:1-Wasserextrakt	151
9.9	Ergebnisse der Diskriminanzanalysen mit Hilfe der Makro- und Mikroelementgehalte in den Kiefern-nadeln (Untersuchungszeitraum 1980-1984)	160
9.10	Zusammenfassung - Kurze Bewertung der Methoden	162
10.	<u>Überprüfung der boden- und nadelanalytischen Daten auf ihre Eignung als Kennwerte der Bodenfruchtbarkeit im Versuch WAL 234</u>	163
10.1	Ernährungszustand der Kiefernbestände	163

10.1.1	Stickstoff- und Phosphor-Spiegelwerte	163
10.1.2	Kalium-, Calcium- und Magnesium-Ernährung	164
10.1.3	Mikronährelement-Versorgung	164
10.2	Ertragskundliche Ergebnisse	167
10.2.1	Kennwerte des verbleibenden Bestands 1983	167
10.2.2	Volumenzuwachs	167
10.3	Korrelationsanalytische Überprüfung der boden- analytischen Kennwerte	167
10.3.1	Kennwerte des Gesamtaufschlusses	167
10.3.2	KAK-Kennwerte	168
10.3.3	Kennwerte der Bodenlösung (GBL/WE)	168
10.4	Beziehungen zwischen dem Volumenzuwachs und dem Ernährungszustand	172
10.5	Beziehungen zwischen Volumenzuwachs und boden- analytischen Kennwerten	172
10.5.1	Kennwerte des Gesamtaufschlusses	172
10.5.2	Kennwerte der KAK	172
10.5.3	Beziehungen zwischen dem Volumenzuwachs und den Kennwerten der Bodenlösungen	173
10.6	Beziehungen zwischen den Nährelementspiegel- werten in den Kiefernadeln und den boden- analytischen Kennwerten	173
10.6.1	Beziehungen zwischen N in den Kiefernadeln und den bodenanalytischen Kennwerten	173
10.6.1.1	Kennwerte des Gesamtaufschlußverfahrens	173
10.6.1.2	Kennwerte der KAK	177
10.6.1.3	Kennwerte der Bodenlösung	177
10.6.2	Beziehungen zwischen Ca in den Kiefernadeln und den bodenanalytischen Kennwerten	177
10.6.2.1	Kennwerte des Gesamtaufschlußverfahrens	177
10.6.2.2	Kennwerte der KAK-Bestimmungsmethoden	177
10.6.2.3	Kennwerte der Bodenlösung	178
11.	<u>Diskussion</u>	179
11.1	Bewertung der Analysenverfahren im Hinblick auf ihre Eignung zur Erfassung von Meliorationseffekten	179
11.1.1	Gesamtaufschlußverfahren	179
11.1.2	KAK-Bestimmungsmethoden	179
11.1.3	Verfahren zur Analyse der Bodenlösung	182
11.2	Interpretation der Beziehungen zwischen Ernährungs- zustand, Wuchsleistung und den bodenanalytischen Kennwerten	185

11.3	Zusammenfassende Beurteilung der Meliorationsverfahren	187
11.3.1	Vergleich der Meliorationsergebnisse mit vorgeschlagenen Kriterien zur Beurteilung der Kalkungs- bzw. Düngungsbedürftigkeit von Waldböden	187
11.3.2	Zusammenfassende Bewertung der Meliorationsverfahren	190
11.4	Empfehlungen für die Praxis	200
12.	<u>Zusammenfassung</u>	201
13.	Literaturverzeichnis	206
14.	Anhangsverzeichnis	210

TABELLENVERZEICHNIS

Tab.		Seite
1	Beschreibung der Meliorationsmaßnahmen im Experiment WAL 234 Pfaffenwinkel (FoA Waldsassen)	12
2	Beschreibung der Meliorationsmaßnahmen im Experiment WAL 228 Pfaffenwinkel (FoA Waldsassen)	14
3	Beschreibung des Meliorationsversuchs Archenohe	17
4	Test - Einfluß der unterschiedlichen Perkulationszeiten (1 = 4-6 h; 2 = 8-10 h) auf die Meßergebnisse für zwei Auflagehumus-Proben aus dem Versuch WAL 228	34
5	Vergleichstest zur Molarität der NH_4Cl -Lösung	35
6	Einfluß steigender Mengen an NH_4Cl -Lösung (1 M) auf die Meßergebnisse (in jeweils 50 ml)	36
7	Vergleichstest zur Bestimmung der H-Konzentration durch Titrimetrie (H_f (Titr)) und Berechnung aus dem pH-Wert (H_f (pH))	37
8	Untersuchte Varianten der Extraktionsmethode in 0,5 M NH_4Cl -Lösung	39
9	Bestimmung der in 0,5 M NH_4Cl extrahierten Kationen nach verschiedenen Alternativen	39
10	Bewertung der Methoden zur Bestimmung der KAK	40
11	Beschreibung der überprüften Varianten zur Analyse der GBL	42
12	Ergebnisse der Überprüfung der GBL-Methode	42
13	Einfluß der gefärbten GBL-Lösungen auf die Meßergebnisse	45
14	Einfluß der gefärbten WE-Lösungen auf die Meßergebnisse	46
15	Untersuchte Varianten der WE-Methode	47
16	Ergebnisse der Vergleichsanalysen nach der WE-Methode	47
17	Bewertung der GBL- und WE-Methode	48
18	pH-Werte, C_org -, N_t -, P_t -Gehalte und die C/N- und C/P-Verhältnisse der Versuchsglieder des Versuchs WAL 234	53
19	Bioelementvorräte im Oberboden (organische Auflage u. Mineralboden 0-30 cm) der Versuchsglieder im Experiment WAL 234	54
20	Ca-, Mg-, K- und Na-Gesamtgehalte (mg/g) der Versuchsglieder im Experiment WAL 234	54
21	Prozentuale Anteile von H^+ , Al^{3+} und Ca^{2+} an der KAK _{eff} und Basensättigung für die Versuchsglieder nach der Perkulationsmethode (1 M NH_4Cl). Experiment WAL 234	57
22	Prozentuale Anteile von H^+ , Al^{3+} und Ca^{2+} an der KAK _{ex} und Basensättigung für die Versuchsglieder nach der Schüttelextraktmethode (0,5 M NH_4Cl). Exp. WAL 234	57

23	Vorräte an austauschbaren Kationen in organischer Auflage und Mineralboden (0-30 cm) der Versuchsglieder nach beiden KAK-Methoden (in kmol IÄ/ha). Experiment WAL 234	60
24	pH-Werte, C_{org} -, N_t -, P_t -Gehalte und die C/N- und C/P-Verhältnisse der Versuchsglieder des Versuchs WAL 228	75
25	Bioelementvorräte im Oberboden (organische Auflage u. Mineralboden 0-30 cm) der Versuchsglieder des Versuchs WAL 228	76
26	Ca-, Mg- und K-Gehalte der Versuchsglieder im Experiment WAL 228	76
27	Prozentuale Anteile von H^+ , Al^{3+} und Ca^{2+} an der KAK _{eff} und Basensättigung für die Versuchsglieder nach der Perkulationsmethode (1 M NH_4Cl). Experiment WAL 228	80
28	Prozentuale Anteile von H^+ , Al^{3+} und Ca^{2+} an der KAK _{ex} und Basensättigung für die Versuchsglieder nach der Schüttelextraktmethode (0,5 M NH_4Cl). Exp. WAL 228	80
29	Vorräte an austauschbaren Kationen in organischer Auflage und Mineralboden (0-30 cm) der Versuchsglieder nach beiden KAK-Methoden (in kmol IÄ/ha). Exp. WAL 228	82
30	pH-Werte, C_{org} -, N_t -, P_t -Gehalte und die C/N- und C/P-Verhältnisse der Versuchsglieder des Versuchs Archenohe	98
31	Bioelementvorräte im Oberboden (organische Auflage u. Mineralboden 0-30 cm) der Versuchsglieder des Versuchs Archenohe	99
32	Ca-, Mg-, K- und Na-Gesamtgehalte (mg/g) der Versuchsglieder des Versuchs Archenohe	99
33	Prozentuale Anteile von H^+ , Al^{3+} und Ca^{2+} an der KAK _{eff} und Basensättigung für die Versuchsglieder nach der Perkulationsmethode (1 M NH_4Cl). Versuch Archenohe	102
34	Prozentuale Anteile von H^+ , Al^{3+} und Ca^{2+} an der KAK _{ex} und Basensättigung für die Versuchsglieder nach der Schüttelextraktmethode (0,5 M NH_4Cl). Versuch Archenohe	102
35	Vorräte an austauschbaren Kationen im Mineralboden (0-30 cm) der Versuchsglieder nach beiden KAK-Methoden (in kmol IÄ/ha). Versuch Archenohe	104
36	Vorräte an organischem Kohlenstoff, Gesamt-Stickstoff und Gesamt-Phosphor im Oberboden (org. Auflage und Mineralboden 0-30 cm) und ihre Veränderungen durch die Melioration. Experiment Großdick	121
37	Vorräte an Gesamt-Calcium, Gesamt-Magnesium und Gesamt-Kalium im Oberboden (org. Auflage und Mineralboden 0-30 cm) und ihre Veränderungen durch die Melioration. Experiment Großdick	125
38	Prozentuale Anteile von H^+ , Al^{3+} und Ca^{2+} an der KAK _{eff} und Basensättigung für die Versuchsglieder nach der Perkulationsmethode (1 M NH_4Cl). Experiment Großdick	128

39	Prozentuale Anteile von H^+ , Al^{3+} und Ca^{2+} an der KAK _{ex} und Basensättigung für die Versuchsglieder nach der Schüttelextraktmethode (0,5 M NH_4Cl). Exp. Großdick	129
40	Vorräte an austauschbaren Kationen in organischer Auflage und Mineralboden (0-30 cm) der Versuchsglieder nach beiden KAK-Methoden (in kmol IÄ/ha). Exp. Großdick	132
41	Vertikalgradient und meliorationsbedingte Veränderung der pH-Werte, Al-, Fe- und Ca-Konzentrationen (mg/l) in GBL und WE (Versuch Großdick, Oktober 1984)	132
42	Beschreibung der wahrscheinlich angewendeten Meliorationsmaßnahmen im Experiment Großdick	136
43	In die Diskriminanzanalyse einbezogene Parameter (Experiment WAL 234)	140
44	Jackknifed-Klassifikation der Diskriminanzanalyse für die Gesamtelementgehalte. Versuch WAL 234	142
45	Jackknifed-Klassifikation der Diskriminanzanalyse für die Kennwerte der effektiven KAK. Versuch WAL 234	145
46	Jackknifed-Klassifikation der Diskriminanzanalyse für die Gehalte an in 0,5 M NH_4Cl extrahierbaren Kationen. Versuch WAL 234	148
47	Jackknifed-Klassifikation der Diskriminanzanalyse für die Kennwerte der GBL nach Entnahmetermin im Experiment WAL 234	152
48	Jackknifed-Klassifikation der Diskriminanzanalyse für die Kennwerte der in Wasser extrahierbaren Ionen nach Entnahmetermin im Experiment WAL 234	153
49	Jackknifed-Klassifikation der Diskriminanzanalysen für die Nadelspiegelwerte im Untersuchungszeitraum 1980-1984. Experiment WAL 234	160
50	Stickstoff- und Phosphorgehalte halbjähriger Kiefernadeln (mg/g Nadel trockenmasse) im Versuch WAL 234	165
51	Kalium-, Calcium- und Magnesiumgehalte halbjähriger Kiefernadeln (mg/g) im Versuch WAL 234	165
52	Bestandskennwerte für den Versuch WAL 234	166
53	Durchschnittlicher jährlicher laufender Zuwachs an Schaftholz (Vfms) und relative Volumenzuwächse in den Untersuchungs Jahren (20) im Versuch WAL 234	166
54	Matrix der einfachen Korrelationskoeffizienten für die Interkorrelationen zwischen den Gesamtelementgehalten in der organischen Auflage und in der Bodentiefe 0-10 cm im Experiment WAL 234	169
55	Matrix der einfachen Korrelationskoeffizienten für die Interkorrelationen zwischen den Kennwerten der KAK in der org. Auflage und Bodentiefe 0-10 cm. Exp. WAL 234	170
56	Matrix der einfachen Korrelationskoeffizienten für die Interkorrelationen zwischen den Kennwerten der Bodenlösung in der Bodentiefe 0-10 cm. Experiment WAL 234	171

57	Matrix der einfachen Korrelationskoeffizienten für die Beziehungen zwischen nadelanalytischen Kennwerten und dem Volumenzuwachs (LZW) im Experiment WAL 234	171
58	Biometrische Daten einiger multiplen linearen Regressionen für die Beziehungen: LZW (y-Var.) in Abhängigkeit von bodenanalytischen Kennwerten (x-Var.) im Experiment WAL 234	174
59	Biometrische Daten einiger multiplen linearen Regressionen für die Beziehungen: N-Spiegelwerte (y-Var.) in Abhängigkeit von bodenanalytischen Kennwerten (x-Var.) im Experiment WAL 234	175
60	Biometrische Daten einiger multiplen linearen Regressionen für die Beziehungen: Ca-Spiegelwerte (y-Var.) in Abhängigkeit von bodenanalytischen Kennwerten (x-Var.) im Experiment WAL 234	176
61	Hauptmerkmale der beiden KAK-Bestimmungsmethoden	180
62	Hauptmerkmale der beiden Verfahren zur Analyse der Bodenlösung	182
63	Vergleich der bodenanalytischen Kennwerte für verschiedene Versuchsvarianten mit den vorgeschlagenen Kalkungskriterien für die Stufe "Kalkung erforderlich"	188
64	Vergleich der bodenanalytischen Kennwerte für verschiedene Versuchsvarianten mit den vorgeschlagenen Kalkungskriterien für die Stufe "Kalkung dringend erforderlich"	188
65	Vergleich der bodenanalytischen Kennwerte für verschiedene Versuchsvarianten nach den vorgeschlagenen K- und Mg-Düngungskriterien	189
66	Übersicht über die durchgeführten Meliorationsmaßnahmen in verschiedenen Experimenten im FA Waldsassen	192
67	Humusformen und pH-Werte sowie prozentuale Veränderung der C_{org} -, N_t -, P_t - und Ca-Vorräte (org. Auflage und Mineralboden 0-30 cm) bei den Meliorationsvarianten im Vergleich zu den unbehandelten Kiefernbeständen	193
68	Ergebnisse der KAK _{ex} -Bestimmungen sowie die H+Al-, Ca-, Mg- und Basenanteile an der KAK _{ex} (nach dem Schüttel-extraktverfahren) für die untersuchten Versuchsglieder im Oberboden (0-10 cm)	196
69	Ca/Al-, Ca/H- und Mg/Al-Molvorratsverhältnisse (org. Auflage und Mineralboden bis 30 cm)	196
70	Zeitliche Veränderung der pH-Werte in GBL, WE und in der Bodensuspension (in Wasser und $CaCl_2$) im Oberboden (0-10 cm) der Versuchsglieder	199
71	Zeitliche Veränderung der Kationensumme (mmol IÄ/l) in GBL und WE sowie der entsprechenden Al- und Ca-Prozentanteile im Vergleich zu den jeweiligen Anteilen an der KAK _{ex} (mmol IÄ/100 g) im Oberboden (0-10 cm) der Versuchsglieder	199

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb.		Seite
1	Darstellung der Versuchsanlage WAL 234	11
2	Darstellung der Versuchsanlage WAL 228	14
3	Darstellung der Versuchsanlage Archenohe	16
4	Darstellung der Versuchsanlage Großdick	19
5	Prozentuale Anteile der einzelnen Kationen an der KAK (mmol IÄ/100 g) nach Perkolation (1 M NH_4Cl) und Schüttelextraktion (0,5 M NH_4Cl); Versuch WAL 234	58
6	Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der pH-Werte in der Gleichgewichtsbodenlösung (GBL) und im 2:1-Wasserextrakt (WE); Versuch WAL 234	63
7	Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der Aluminium-, Eisen- und Calcium-Konzentrationen (mg/l) in der GBL; Versuch WAL 234	64
8	Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der Aluminium-, Eisen- und Calcium-Konzentrationen (mg/l) im WE; Versuch WAL 234	65
9	Prozentuale Anteile der einzelnen Kationen an der Kationensumme (SKa in mmol IÄ/l) in der GBL; Versuch WAL 234	68
10	Prozentuale Anteile der einzelnen Kationen an der Kationensumme (SKa in mmol IÄ/l) im WE; Versuch WAL 234	69
11	Prozentuale Anteile der einzelnen Kationen an der KAK (mmol IÄ/100 g) nach Perkolation (1 M NH_4Cl) und Schüttelextraktion (0,5 M NH_4Cl); Versuch WAL 228	81
12	Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der pH-Werte in der Gleichgewichtsbodenlösung (GBL) und im 2:1-Wasserextrakt (WE); Versuch WAL 228	86
13	Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der Aluminium-, Eisen- und Calcium-Konzentrationen (mg/l) in der GBL; Versuch WAL 228	87
14	Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der Aluminium-, Eisen- und Calcium-Konzentrationen (mg/l) im WE; Versuch WAL 228	88
15	Prozentuale Anteile der einzelnen Kationen an der Kationensumme (SKa in mmol IÄ/l) in der GBL; Versuch WAL 228	92
16	Prozentuale Anteile der einzelnen Kationen an der Kationensumme (SKa in mmol IÄ/l) im WE; Versuch WAL 228	93
17	Prozentuale Anteile der einzelnen Kationen an der KAK (mmol IÄ/100 g) nach Perkolation (1 M NH_4Cl) und Schüttelextraktion (0,5 M NH_4Cl); Versuch Archenohe	103
18	Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der pH-Werte in der Gleichgewichtsbodenlösung (GBL) und im 2:1-Wasserextrakt (WE); Versuch Archenohe	107
19	Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der Aluminium-, Eisen- und Calcium-Konzentrationen (mg/l) in der GBL; Versuch Archenohe	108

20	Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der Aluminium-, Eisen- u. Calcium-Konzentrationen (mg/l) im WE; Versuch Archenohe	109
21	Prozentuale Anteile der einzelnen Kationen an der Kationensumme (SKa in mmol IÄ/l) in der GBL; Versuch Archenohe	112
22	Prozentuale Anteile der einzelnen Kationen an der Kationensumme (SKa in mmol IÄ/l) im WE; Versuch Archenohe	113
23	pH-Werte der Versuchsglieder im Experiment Großdick	119
24	Gehalte an organischem Kohlenstoff der Versuchsglieder im Experiment Großdick	119
25	Gehalte an Gesamtstickstoff der Versuchsglieder im Experiment Großdick	119
26	C/N-Verhältnis der Versuchsglieder im Experiment Großdick	119
27	Phosphorgehalte der Versuchsglieder im Experiment Großdick	122
28	Gesamt-Calciumgehalte der Versuchsglieder im Experiment Großdick	122
29	Magnesiumgehalte der Versuchsglieder im Experiment Großdick	122
30	Prozentuale Anteile der einzelnen Kationen an der KAK (mmol IÄ/100 g) nach Perkolation (1 M NH_4Cl) und Schüttelextraktion (0,5 M NH_4Cl); Versuch Großdick	130
31	Prozentuale Anteile der einzelnen Kationen an der Kationensumme (SKa in mmol IÄ/l) in GBL und WE; Versuch Großdick	134
32 a-d	Schrittweise Diskriminanzanalyse: Beziehungen zwischen den ersten beiden kanonischen Variablen und den Gruppenmittelwerten (Prüfglieder) für die Gesamtaufschlußmethode im Versuch WAL 234	143
33 a-d	Schrittweise Diskriminanzanalyse: Beziehungen zwischen den ersten beiden kanonischen Variablen und den Gruppenmittelwerten (Prüfglieder) für das Perkolationsverfahren im Versuch WAL 234	146
34 a-d	Schrittweise Diskriminanzanalyse: Beziehungen zwischen den ersten beiden kanonischen Variablen und den Gruppenmittelwerten (Prüfglieder) für das Schüttel-extraktverfahren im Versuch WAL 234	149
35 a-c	Schrittweise Diskriminanzanalyse: Beziehungen zwischen den ersten beiden kanonischen Variablen und den Gruppenmittelwerten (Prüfglieder) für die Kennwerte der Gleichgewichtsbodenlösung im Versuch WAL 234 (April)	154
36 a-c	Schrittweise Diskriminanzanalyse: Beziehungen zwischen den ersten beiden kanonischen Variablen und den Gruppenmittelwerten (Prüfglieder) für die Kennwerte der Gleichgewichtsbodenlösung im Versuch WAL 234 (Juli)	155

37 a-c	Schrittweise Diskriminanzanalyse: Beziehungen zwischen den ersten beiden kanonischen Variablen und den Gruppenmittelwerten (Prüfglieder) für die Kennwerte der Gleichgewichtsbodenlösung im Vers. WAL 234 (Oktober)	156
38 a-c	Schrittweise Diskriminanzanalyse: Beziehungen zwischen den ersten beiden kanonischen Variablen und den Gruppenmittelwerten (Prüfglieder) für die Kennwerte des Wasserextrakts im Versuch WAL 234 (April)	157
39 a-c	Schrittweise Diskriminanzanalyse: Beziehungen zwischen den ersten beiden kanonischen Variablen und den Gruppenmittelwerten (Prüfglieder) für die Kennwerte des Wasserextrakts im Versuch WAL 234 (Juli)	158
40 a-c	Schrittweise Diskriminanzanalyse: Beziehungen zwischen den ersten beiden kanonischen Variablen und den Gruppenmittelwerten (Prüfglieder) für die Kennwerte des Wasserextrakts im Versuch WAL 234 (Oktober)	159
41 a-c	Schrittweise Diskriminanzanalyse: Beziehungen zwischen den ersten beiden kanonischen Variablen und den Gruppenmittelwerten (Prüfglieder) für die Nährelementspiegelwerte in den Kiefernadeln; Versuch WAL 234	161

ANHANGSVERZEICHNIS

	Seite
A (Versuch WAL 234)	
A-0 Allgemeine Kennwerte	2
A-1 Kennwerte des Gesamtaufschlusses	6
A-2 Methodenvergleich zur Bestimmung der KAK	11
A-3 Perkulationsmethode	14
A-4 Schüttelextraktmethode	20
A-5 Prozentanteile der Kationen an der KAK	26
A-6 Gleichgewichtsbodenlösung (in mg/l)	28
A-7 Gleichgewichtsbodenlösung (in mmol IÄ/l)	37
A-8 Wasserextrakt (in mg/l)	49
A-9 Wasserextrakt (in mmol IÄ/l)	58
A-10 Molverhältnisse von Ca/Al, Ca/H, Mg/Al und Mg/Ca in der GBL und im WE	70
A-11 Überprüfung der jahreszeitlichen Schwankungen der Gleichgewichtsbodenlösung	76
A-12 Überprüfung der jahreszeitlichen Schwankungen des Wasserextrakts	81
A-13 Prozentanteile der Kationen und Anionen in der GBL und im WE	86
B (Versuch WAL 228)	
B-0 Allgemeine Kennwerte	93
B-1 Kennwerte des Gesamtaufschlusses	96
B-2 Methodenvergleich zur Bestimmung der KAK	99
B-3 Perkulationsmethode	102
B-4 Schüttelextraktmethode	108
B-5 Prozentanteile der Kationen an der KAK	114
B-6 Gleichgewichtsbodenlösung	116
B-7 Wasserextrakt	128
B-8 Molverhältnisse von Ca/Al, Ca/H, Mg/Al und Mg/Ca in der GBL und im WE	140
B-9 Überprüfung der jahreszeitlichen Schwankungen der Gleichgewichtsbodenlösung	146
B-10 Überprüfung der jahreszeitlichen Schwankungen des Wasserextrakts	151
B-11 Prozentanteile der Kationen und Anionen in der GBL und im WE	156

	Seite
C (Versuch Archenohe)	
C-0 Allgemeine Kennwerte	163
C-1 Kennwerte des Gesamtaufschlusses	165
C-2 Perkolations- und Schüttelextraktmethode	168
C-3 Prozentanteile der Kationen an der KAK	172
C-4 Gleichgewichtsbodenlösung	174
C-5 Wasserextrakt	177
C-6 Molverhältnisse in GBL und WE	180
C-7 Prozentanteile der Kationen und Anionen in GBL und WE	182
D (Versuch Großdick)	
D-0 Allgemeine Kennwerte	185
D-1 Kennwerte des Gesamtaufschlusses	188
D-2 Methodenvergleich zur Bestimmung der KAK	193
D-3 Perkolationsmethode	196
D-4 Schüttelextraktmethode	201
D-5 Prozentanteile der Kationen an der KAK	207
D-6 Gleichgewichtsbodenlösung	209
D-7 Wasserextrakt	212
D-8 Molverhältnisse in GBL und WE	215
D-9 Prozentanteile der Kationen und Anionen in GBL und WE	216
E (Nadelspiegelwerte im Versuch WAL 234 im Untersuchungszeitraum 1980-1984)	
E-0 Versuchsglied Kontrolle	219
E-1 Versuchsglied Volldüngung	220
E-2 Versuchsglied Lupinen-Unterbau	221
E-3 Durchschnittliche Nadelspiegelwerte der Versuchs- varianten	222

Anmerkung:

Aufgrund des sehr umfangreichen Datenmaterials werden die im Tabellenanhang dargestellten Basisdaten nicht in der gedruckten Form der Dissertation veröffentlicht. Der gesamte Anhang kann jedoch auf Anfrage in Kopie zugesandt werden und ist beim Lehrstuhl für Bodenkunde der Ludwig-Maximilians-Universität München erhältlich.

1. Einleitung und Fragestellung

1.1 Einleitung

In der vorliegenden Arbeit werden mehrere zur Zeit angewandte und auch neu vorgeschlagene Analysenverfahren zur chemischen Charakterisierung von Waldböden überprüft. Dabei gilt die besondere Aufmerksamkeit der Frage, wie die Auswirkungen von Meliorationsmaßnahmen am besten erfaßt werden können.

Die Forschung über Methoden zur chemischen Kennzeichnung von Waldböden hat im letzten Jahrzehnt Fortschritte erzielt. Neben die Standardverfahren (Bestimmung der Gesamtnährelementgehalte und der effektiven Kationenaustauschkapazität) treten mehrere Ansätze zur Untersuchung der Bodenlösung. Die Blattanalyse kennzeichnet den Ernährungszustand der Bestände und läßt gewisse Rückschlüsse auf den chemischen Bodenzustand zu, kann aber die chemische Bodenanalyse nicht ersetzen. Diese ist für die Erforschung der Ursachen für bestimmte Ernährungszustände der Bestockung unerlässlich.

Für viele der bereits eingesetzten und der neu vorgeschlagenen chemischen Bodenanalysenverfahren gilt, daß eine umfassende Bewertung durch Vergleich mit gleichzeitig ermittelten waldwachstumskundlichen und/oder nadelanalytischen Kennwerten noch fehlt. Der Anwendung von Standardverfahren für die chemische Kennzeichnung von Waldböden stehen im übrigen z. T. auch noch schwer lösbare methodische Probleme entgegen. Schließlich sind auch die vorgeschlagenen Bewertungskriterien und Grenzwerte noch unsicher, so daß nur mit Einschränkungen Meliorationsempfehlungen für Waldstandorte abgeleitet werden können.

Die im folgenden beschriebenen und überprüften Bodenuntersuchungsmethoden zielen darauf ab, die wasserlöslichen und die austauschbaren Nähr- bzw. Schadelemente sowie die Gesamtgehalte an Bioelementen auf verschiedenartig meliorierten Flächen und auf Kontrollparzellen zu erfassen und auf diese Weise den bodenchemischen Zustand vielseitig zu beschreiben. Die Untersuchung von Meliorationsexperimenten besitzt dabei den großen Vorteil, daß die Reaktionen der Bestände auf die Eingriffe in die Betrachtung mit einbezogen werden können.

Das seit mehr als drei Jahrzehnten angewendete Gesamtanalyseverfahren

charakterisiert den Gesamtvorrat an Nährelementen im Solum oder Wurzelraum; es liefert jedoch unspezifische Ergebnisse, deren Interpretation viele Voraussetzungen verlangt (SCHLICHTING und BLUME, 1966). Aussagen über die Verfügbarkeit sind häufig unsicher.

Als zweiter Satz von Kenngrößen werden die kurz- und mittelfristig verfügbaren Nährstoffreserven durch Bestimmung der effektiven Kationenaustauschkapazität (Perkolationsmethode nach ULRICH, 1966) bzw. der extrahierbaren Kationen (TRUBY und ALDINGER, 1984) erfaßt. Diese Methoden haben den prinzipiellen Nachteil, daß die für die Bäume verfügbaren, durch rasche Mineralisation und Verwitterung freigesetzten Nährstoffvorräte nicht berücksichtigt sind.

Als dritter Ansatz wird die Untersuchung der Bodenlösung nach verschiedenen Methoden betrachtet. Diese wird als die flüssige Phase des Bodens definiert (SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL, 1982). Durch diese Untersuchung wird der den Pflanzen aktuell zur Verfügung stehende Vorrat an Ionen ermittelt. Zahlreiche methodische Probleme, die bei der Gewinnung der Bodenlösung auftreten, werden von FRIED und BROES-HARD (1967) beschrieben. Einzelne Fragestellungen wie z. B. der Einfluß der Boden/Lösungs-Verhältnisse und der Dauer der Gleichgewichtseinstellung wurden von ULRICH und KHANNA (1971, 1972) und ULRICH et al. (1984) behandelt. Über weitere technische Probleme bei der Gewinnung der GBL berichten BERGSETH (1983) und REYNOLDS (1984).

Als Untersuchungsgrundlage dienen vier forstliche Meliorationsversuche auf stark devastierten Phyllit-Standorten mit Kiefernbeständen im Waldsassener Raum (Oberpfalz, Nordost-Bayern). In den Experimenten werden kombinierte technische und biologische Maßnahmen wie Voll-düngung und Leguminosenanbau (Versuch WAL 234), N-Dünger (Versuch WAL 228), Weißerlenanbau (Versuch Archenohe) und das sogenannte Waldbrache-Verfahren (Versuch Großdick) erprobt. Die Bodenformen sind saure Braunerden und Podsol-Braunerden aus schluffigem Phyllit-schutt. Sie sind äußerst arm an Calcium und Magnesium, jedoch mäßig ausgestattet mit Kalium und Phosphor. Alle Standorte trugen früher nach z. T. extremer Streunutzung geringwüchsige Kiefernbestände mit Zwergstrauchunterwuchs und biologisch inaktivem Rohhumus. Der Bodenvorrat an leicht mineralisierbarem Stickstoff ist als Folge der Streunutzung verringert. Dieser Verarmung bei ungünstigem Humuszu-

stand fällt hierbei eine entscheidende Rolle zu (LAATSCH, 1963; KREUTZER, 1967 u. 1972; REHFUESS und SCHMIDT, 1971; PREUHSLE und REHFUESS, 1982).

1.2 Fragestellung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die meliorationsbedingten Veränderungen der gesamten Nährelementvorräte im Boden, der Kennwerte der effektiven Kationenaustauschkapazität und der Zusammensetzung der Bodenlösung in den vier oben genannten Experimenten zu untersuchen und Beziehungen herzustellen zu den Kennwerten für den Ernährungszustand und das Wachstum der Kiefern. In der Literatur vorliegende Erkenntnisse über diese chemischen Methoden sollten überprüft und ergänzt werden. Die Untersuchungen sollen im einzelnen folgende drei Fragen beantworten:

1. Wie wirken sich die verschiedenen Meliorationsmaßnahmen auf den bodenchemischen Zustand, die Elementgehalte in den Nadeln und das Wachstum der Bäume aus?
2. Welche Beziehungen gibt es zwischen den Bodenkennwerten, dem Ernährungszustand und dem Wachstum der Bestände?
3. Welches Vorgehen bei der Bodenanalyse ist am besten dazu geeignet, die Meliorationswirkungen zu charakterisieren, und welche Kriterien lassen sich herleiten für die Beurteilung der Meliorationsbedürftigkeit stark versauerter Substrate?

2. Beschreibung des Untersuchungsgebietes und der Meliorationsversuche

2.1 Beschreibung des Untersuchungsgebietes

2.1.1 Allgemeine Beschreibung

Das im nordöstlichen Teil der Oberpfalz gelegene Untersuchungsgebiet befindet sich im Bereich des Forstamts Waldsassen. Nach der forstlichen Wuchsgebietsgliederung (KREUTZER und FOERST, 1978) ist das Forstamt Waldsassen dem Wuchsgebiet Oberpfälzer Wald, Wuchsbezirk Waldsassener Schiefergebirge, zuzuordnen. Die untersuchten Flächen liegen in ebener bis leicht hängiger Lage um 500 m über NN (460-580). Charakteristisch für den Waldsassener Raum ist ein Flachhöhenrelief mit welligen Hochflächen, sanft bis scharf eingearbeiteten Talungen sowie Talweitungen und Senkungsfeldern.

Die Oberpfalz gilt als Stammland der forstlichen Standortsmelioration. Viele Versuche, Mischwälder zu begründen und die Ertrags-situation zu verbessern, wurden hier unternommen. Seit rund 25 Jahren lassen die Bemühungen um eine Verbesserung des Waldzustandes sichtbare Erfolge erkennen.

2.1.2 Geologie

Die Landschaftsräume des eigentlichen Fichtelgebirges, des Steinwaldes und des Waldsassener Schiefergebirges werden unter dem Begriff "Fichtelgebirge" zusammengefaßt. Seine Grenzen bilden im Südwesten der Fichtelgebirgs-Randbruch (Fränkische Linie), im Süden die Erbdorfer Linie. Im Osten geht das Fichtelgebirge in das Erzgebirge über. Das Gebiet östlich des eigentlichen Fichtelgebirges wird dabei als Waldsassener Schiefergebirge bezeichnet.

Das Waldsassener Schiefergebirge gehört zur Böhmisches Masse, die dem Grundgebirge angehört. Im Aufbau des variskischen Grundgebirges lassen sich das Saxothuringikum und Moldanubikum als zwei große Zonen unterscheiden. Der Raum Waldsassen liegt ausschließlich in der saxothuringischen Zone, die eine vom Kambrium bis zum Unterkambrium reichende paläozoische Schichtenfolge aufweist.

Nach GAERTNER (1942, 1950; zitiert in SCHRAMM, 1985), wird ein Teil der präkambrischen und unterkambrischen Folgen zur Arzberger Serie zusammengefaßt, die zum Teil den tieferen Untergrund des Waldsassener Schiefergebirges bildet. Im Hangenden des Kambriums schließt die Waldsassener Serie an, die ins Ordovizium zu ordnen ist. Sie beginnt mit den feinglimmerigen Frauenbachquarziten. Sandstreifige Tonschiefer und Quarzite der Phycodenschichten schließen sich an die Frauenbach-Serie an. Ihre charakteristische Bänderung beruht auf schwankenden Quarzanteilen der tonig-sandigen Sedimentation. In diesen Schichten klingt die Regionalmetamorphose allmählich ab (vom phyllitischen Quarzanteil der tonig-sandigen Sedimentation zu fast anchimetamorphen Tonschiefern mit dem Leitfossil *Phycodes circinatus*). Den Abschluß des Ordoviziums bilden die Gräfenthaler Schichten mit blaugrauen, schwach phyllitischen Dach- und Griffelschiefern und dem unteren und oberen Erzhorizont.

Geologisch gehören die Versuchsflächen zur Waldsassener Phyllitmulde. Seinen Namen verdankt dieses metamorphe Gestein dem hohen Anteil an Sericit, der es blättrig erscheinen läßt. Die Glimmerkristalle im Phyllit sind kleiner als die von Ton- und größer als die von Glimmerschiefern, so daß der Phyllit schluffig verwittert.

Im Untersuchungsgebiet Pfaffenwinkel (Versuch Nr. 234 und 228) und Großdick liegen die Phycoden-Quarzite (Phyllit) und die Gräfenthaler Schichten (Quarzit-Schiefer und Schiefer) bzw. Phycoden-Schiefer (Phyllit) verwittert vor. Der Versuch Archenohe liegt ebenfalls auf Phyllitverwitterungs-Substrat (vgl. geologische Karte 5940 Hatzenreuth 1:25000). Anstehendes Gestein fehlt auf allen Standorten.

2.1.3 Böden

Die Bodenentwicklung im Waldsassener Schiefergebiet war bereits im Tertiär unter den damals vorherrschenden tropischen und subtropischen Klimabedingungen weit fortgeschritten (siehe dazu SCHRAMM, 1985). Nach Einsetzen der Eiszeiten brach diese Entwicklung ab; kennzeichnend für die Periglazialgebiete prägten nun solifluktive Prozesse das Landschaftsbild. Die bereits verwitterten Bodendecken wurden hierbei umgelagert und vermischt, das Relief verebnet. Nur in den Zwischeneiszeiten ist eine gewisse Bodenbildung anzunehmen, deren

Spuren in den folgenden Kaltzeiten jedoch wieder verwischt wurden. Zu Beginn des Holozäns setzte auf den vor allem im Unterhangbereich mächtigen Schuttdecken eine erneute Verbraunung und Verlehmung ein. Dabei schritt die Entwicklung wohl sehr rasch zu Braunerden fort.

Die Bodenentwicklung wurde in den letzten Jahrhunderten entscheidend durch anthropogene Einwirkungen geprägt (siehe 2.1.5). Charakteristisch für die Böden im Waldsassener Raum sind heute mächtige, biologisch inaktive Rohhumusauflagen, scharf abgegrenzt von dem darunter folgenden Mineralboden. Dieser zeigt eine flache, aber deutlich ausgeprägte Podsolierung in den stark sauren A_{eh} - und A_e -Horizonten. Für ein relativ spätes Entstehen dieser Bleichungen spricht, daß darunter sichtbare Anreicherungshorizonte weitgehend fehlen und auch durch Sesquioxidfraktionierung nicht aufgedeckt werden können (SCHRAMM, 1985).

Die Stickstoff-, Calcium- und Magnesiumvorräte sind gering, bedingt sowohl durch die Eigenart des Muttergesteins und durch die sehr lange Verwitterungszeit (Ca und Mg) als auch den jahrhundertelangen Entzug durch die Streunutzung (N). Die Mineralisation des organisch gebundenen Stickstoffs und Phosphors ist gehemmt, die Nährstoffnachlieferung somit gering.

Das Bodenleben ist stark beeinträchtigt. Unter den stark sauren Bedingungen herrscht pilzliche Zersetzung vor, die wühlende Bodenfauna fehlt weitgehend.

Als dominante Bodenform finden sich vorwiegend podsolige bis Podsol-Braunerden (DBG, Kartieranleitung 1982) mit schluffiger Bodenart. In Mulden mit dichten, tonreichen Lagen und Stauwassereinfluß im Unterboden entwickelten sich saure Pseudogley-Braunerden.

Die bodentypologische Einordnung nach der Soil Taxonomy führt im allgemeinen zu der Untergruppe Typic Dystrachrepts, nach der FAO-UNESCO-Nomenklatur zu den Dystric Cambisols (SCHRAMM, 1985).

2.1.4 Klima

Das Waldsassener Gebiet ist den Makroklimabezirken "Oberpfälzer Wald" und "Thüringisch-Fränkisches Mittelgebirge" zuzuordnen. Es zeichnet sich aus durch ein rauhes, subkontinental getöntes Klima

mit relativ kurzer Vegetationszeit (5 Monate von Mai bis September), geringe Jahresmitteltemperatur, häufige Spätfroste, geringe Niederschlagsmengen sowie durch Trockenschäden in Dürrejahren. Die Jahresmittelniederschlagsmenge beträgt 563 mm mit Schwankungen zwischen 545 und 615 mm (Meßstelle: Hatzenreuth). Die Niederschlagsmittelsumme der einzelnen Monate und des ganzen Jahres sind im folgenden für den Zeitraum 1946-1967 aufgeführt:

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Jahr
34	25	28	39	55	73	88	61	50	40	33	37	563

Auffallend sind die relativ hohen Sommer-Niederschläge (Mai-August), die rund 50 % der Jahresmengen ausmachen.

Die Jahresmitteltemperatur beträgt 6°C mit einer mittleren Jahreschwankung von 19°C . Während der Vegetationsperiode erreicht sie einen Durchschnittswert von 14°C . Die mittleren Temperaturen im April, Juli und Oktober betragen $5-7^{\circ}\text{C}$, $15-17^{\circ}\text{C}$ bzw. $6-7^{\circ}\text{C}$.

Die regenbringenden Winde kommen vorwiegend aus westlichen Richtungen. Infolge der Regenschattenlage (vorliegendes Fichtelgebirge und Steinwald) zählt diese Gegend zu den niederschlagsärmsten und sonnigsten Teilen der Oberpfalz.

2.1.5 Waldgeschichte

Zu Beginn des 6. Jahrhunderts war die Oberpfalz noch von ausgedehnten Urwäldern bedeckt. In die großen, zusammenhängenden Wälder wagten sich die Siedler nur zögernd. Zuerst wurde der südwestliche Teil der heutigen Oberpfalz kolonisiert. Von hier aus drangen die bayerischen Siedler allmählich nach Norden und Osten vor. Der ersten Besiedlung folgte eine Rodungsperiode, die etwa vom 9. bis 13. Jh. dauerte. Die Rodungswelle erfaßte auch die bisher noch unerschlossenen Mischwälder auf der Jurahochfläche, auf den Sandböden des vor dem Jura liegenden Schollenlandes und vor allem die Ausläufer des Nordwaldes in den Randgebieten. Im 11. Jh. erreichten die Siedler Tirschenreuth und Eger. Im Jahre 1130/33 wurde das Kloster Waldsassen begründet. Für die Kolonisation der Oberpfalz waren vor allem Klöster verantwortlich; sie übten auch die Grundherrschaft über die Ansiedler aus.

Die Bauern erhielten gegen Zins alle Bau-, Nutz- und Brennholzrechte, dazu Streunutzungsrechte und die Erlaubnis zur Waldweide für das Vieh.

Im 13. Jh. war bereits im wesentlichen die heutige Wald- und Feldverteilung erreicht.

Den stärksten Einfluß auf die Wälder der Oberpfalz hatte die vom 13. bis 16. Jh. intensiv betriebene Eisengewinnung. Besonders begehrt war Holzkohle aus Kiefer-Mittelhölzern (meist 50-60jährige Bestände). Durch den großen Holzbedarf der Hammerwerke drang die Kiefer immer weiter vor, sie wurde schließlich die herrschende Baumart. Großflächige Kahlschläge förderten die Verheidung. In den folgenden Jahrhunderten sank die Oberpfälzer Eisenindustrie jedoch dann fast bis zur Bedeutungslosigkeit ab.

Im 15. Jh. führte die Siedlungstätigkeit wegen der Holzmassivbauweise zu einer ersten Holzverknappung (insbesondere bei Eiche). Im 16. Jh. wurde die Schafweide bzw. die Großviehhaltung eingeführt. Die aufkommende Verjüngung im Wald wurde von weidenden Schafen und Rindern ständig zurückgebissen, wodurch es zu einer Verlichtung der Bestände kam.

Mitte des 18. Jh. stellte man das Vieh immer mehr auf Stallhaltung um und begann mit der Streunutzung. Diese war noch bis nach dem zweiten Weltkrieg üblich und wurde mit örtlich und zeitlich wechselnder Intensität betrieben. (RODENKIRCHEN, 1982).

Die natürliche Regionalwaldgesellschaft ist (nach FOERST und KREUTZER, 1978) ein kontinental getönter Stieleichen-Winterlinden-Mischwald. Die ehemaligen eichenreichen Mischwälder verschwanden jedoch vollständig und wurden durch großflächige Bestände der genügsamen Kiefer ersetzt. Eine den natürlichen Verhältnissen entsprechende Bestockung tritt kaum noch auf, wobei der Anteil von Eichen und Tannen besonders stark zurückgegangen ist. Natürliche Buchen-Tannenwälder sind erst in Lagen über 600 m zu finden. Im Basaltgebiet werden die Buchen-Tannenwälder auf Steilhängen und Schutt-Blockhalden von Eschen-Ahornwäldern abgelöst. Grundwasserbeeinflusste Standorte tragen mit Fichte durchsetzte Erlenbruchwälder.

2.1.6 Bodenvegetation

Die Bodenvegetation ist geprägt durch die für streugenutzte Rohhumusstandorte typischen Zwergsträucher (*Vacc. species*, *Calluna vulgaris*), Moose und Flechten (*Dicranum undulatum*, *Leucobryum glaucum*, *Cladonia rangifera*, *Cetraria islandica*) mit hohem Deckungsgrad. Die Artenvielfalt und -diversität in der Krautschicht ist gering. Die ökologischen Zeigerwerte nach ELLENBERG verdeutlichen die stark sauren Oberbodenbedingungen sowie eine geringe biologische Aktivität der Böden (MAKESCHIN et al. 1985). Die auflaufende Naturverjüngung beschränkt sich fast ausschließlich auf Kiefer, Fichte sowie vereinzelt auch Birke.

2.2 Beschreibung der Meliorationsversuche

2.2.1 Versuch WAL 234

2.2.1.1 Ziel des Versuches

In diesem Versuch galt es zu klären, mit welchen Meliorationsverfahren der verbreitete N-Mangel sowie die allgemein geringe Wachstumsleistung der Kiefer im mittleren Bestandesalter verbessert werden kann. Zu vergleichen waren die Auswirkungen einer wiederholten Stickstoffdüngung mit einem biologischen N-Eintrag durch Lupinenunterbau, jeweils ergänzt durch eine Grunddüngung zu Versuchsbeginn. Da zur Etablierung der Lupinen ein Einfräsen der organischen Auflage in den Mineralboden notwendig war, wurde zur Abschätzung der Effekte dieser anfänglichen Bodenbearbeitung eine weitere Fräs-Variante in den Versuchsplan aufgenommen.

Bisherige Ergebnisse zu diesem Versuch wurden bereits von REHFUEß und SCHMIDT (1971), PREUßSLER und REHFUEß (1982), VÖLKL (1983) und MAKESCHIN et al. (1985) publiziert.

2.2.1.2 Standort und Bestandsmerkmale

Der Versuch wurde 1964 im FoA Waldsassen Distr. I Mühlbühl, Abt. 15b Pfaffenwinkel in einem damals durchschnittlich 85jährigen Kiefern-

Baumholz etwa IV.6 Bonität (Ertragstafel WIEDEMANN 1943, mäßige Durchforstung) mit hauptsächlich Vaccinium-Calluna-Unterwuchs angelegt.

Der Standort liegt in 528-543 m über NN an einem flach nach NW geneigten Hochflächenrücken (5-7 % Neigung) auf einer Podsol-Braunerde (O-A_{eh}-B_{gr}-B_{v1}-B_{v2}-B_{v3}-II-III-IV-B_v-Profil) aus schluffiger Phyllit-verwitterungs-Fließerde (40-50 cm) über Phyllitzersatz mit mäßig-frischer Wasserversorgung.

Der zu Versuchsbeginn sehr geringwüchsige und geschlossene Kiefernbestand (mit wenigen unterständigen Fichten und einigen Lärchen) wurde zumeist schwach durchforstet (1967, 1970, 1974 und 1984). 1979 erfolgte eine starke Durchforstung zum Zweck der Stammzahlgleichstellung.

2.2.1.3 Versuchsanlage und Meliorationsverfahren

Die Versuchsanlage ist in Abb. 1 dargestellt. Der Versuch umfaßt folgende vier Versuchsglieder mit je dreifacher Wiederholung in drei Blöcken:

- Ko oder O = Kontrolle
- Vo oder I = CaPKMg-Grund- und 3fach wiederholte N-Düngung (Volldüngung)
- II = CaPKMg-Grunddüngung, Fräsen
- III = CaPKMg-Grunddüngung, Fräsen und Lupinenunterbau

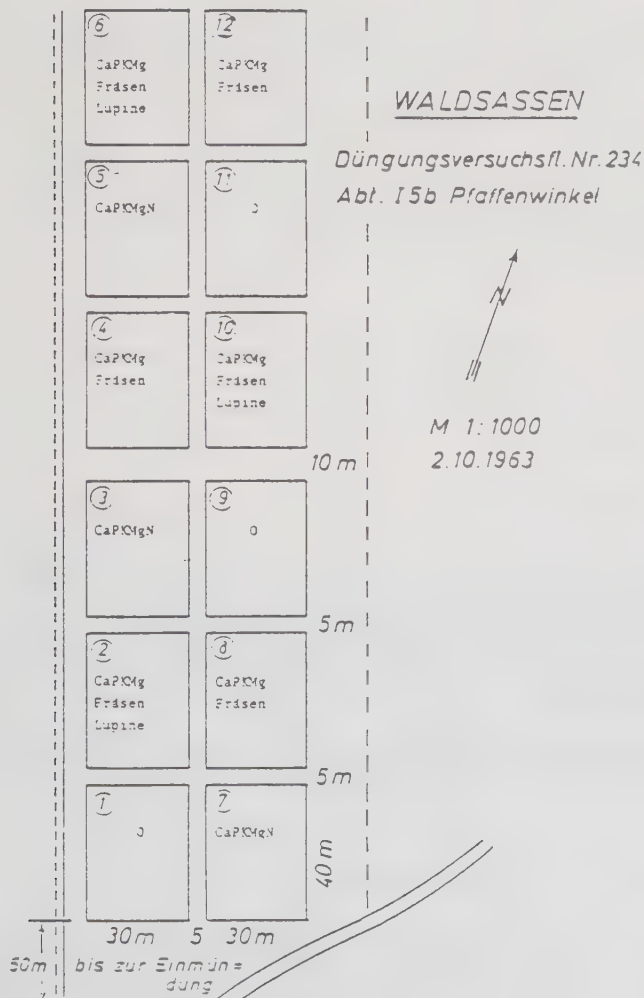
Innerhalb der Blöcke sind die Versuchsglieder zufällig verteilt. Die Parzellen sind 0,12 ha groß (30x40 m) und durch 5 m breite Trennstreifen isoliert. Der Versuch steht unter Zaunschutz.

Tab. 1 informiert über die Versuchsglieder sowie Art und Zeitpunkt der durchgeführten Meliorationsmaßnahmen. Die Meliorationsmaßnahmen erfolgten in den Jahren 1964, 1966 und 1972. Eine zusätzliche Düngung mit Superphosphat im Jahre 1967 sollte das bis dahin unbefriedigende Lupinenwachstum anregen und wurde zur besseren Vergleichbarkeit auf allen meliorierten Versuchsgliedern durchgeführt.

Da bei der Variante II (Grunddüngung und Fräsung) weder bei den Nadelspiegelwerten noch bei der Wuchsleistung deutliche Unterschiede

gegenüber der Kontrollvariante zu verzeichnen waren, wurde sie nicht in die biochemischen Auswertungen einbezogen.

Abb.1 : Darstellung der Versuchsanlage WAL 234



Tab. 1: Beschreibung der Meliorationsmaßnahmen im Experiment WAL 234 Pfaffenwinkel (FoA Waldsassen)

Versuchsglied	Meliorationseingriffe und Termine					Gedüngte Nähr- elementmengen insges. (kg/ha)
	1960	1965	1966	1967	1972	
Kontrolle (0)	-	-	-	-	-	-
Parz. 1, 9, 11						
Volldüngung (I)	40 dt CaCO ₃		5 dt KAS	3 dt Sup-P	5 dt KAS	N 370 P 95 K 90 Ca 2095 Mg 32
CaPKMg + N	10 dt Thomas-P					
Parz. 3, 5, 7	4 dt Potentkall					
	5 dt KAS					
Lupinen-	40 dt CaCO ₃	10 Kg/ha L.E.		3 dt Sup-P		N (Lupine) P 95 K 90 Ca 1900 Mg 32
unterbau (III)	10 dt Thomas-P					
CaPKMg + Fräsen	4 dt Potentkall					
+ Lupine						
Parz. 2, 6, 10	20 Kg/ha L.E.					

Thomas-P = Thomasphosphat
 Sup-P = Kalkstickstoff
 KAS = Kalkammonsalpeter
 L.E. = Lupineneinsatz

2.2.2 Versuch WAL 228

2.2.2.1 Ziel des Versuches

Das Ziel dieses Meliorationsversuches war es, die Auswirkungen mehrmaliger N-Düngungen mit Kalkammonsalpeter oder Kalkstickstoff, kombiniert mit einer Thomasphosphatgabe zu Versuchsbeginn, auf die Wachstumsleistung und den Ernährungszustand eines mittelalten Kiefernstangenholzes zu untersuchen.

Bisherige Forschungsergebnisse wurden von KREUTZER (1967), KENNEL (1967), MAIER (1983) und MAKESCHIN et al. (1985) vorgelegt.

2.2.2.2 Standort und Bestandsmerkmale

Der Versuch wurde im Frühjahr 1960 in einem etwa 52jährigen Kiefernbestand mit III,5 bis IV,0 Bonität (nach WIEDEMANN 1943, mäßige Durchforstung) in unmittelbarer Nachbarschaft des Versuchs WAL 234

im Distr. I Mühlbühl Abt. I,5c Pfaffenwinkel mit vorwiegend armer Moos- und Flechten-Vegetation und stellenweisem Vaccinium-Unterswuchs angelegt.

Der Standort liegt in 510-520 m Höhe über NN an einem Mittelhang mit schwach konkavem Relief in NW-Exposition (7-9 % Neigung) auf einer podsoligen Braunerde mit schwacher Pseudovergleyung im Untergrund (O-A_{eh}-A_{he}-A_e-B_v-(S_w)B_v-Profil) aus einer diluvialen, relativ skeltarmen, schluffig-lehmigen Phyllit-Fließerdedecke über tiefgründigem (2 m), dichten, schluffigem Phyllitzersatz. Der Wasserhaushalt wird als frisch bis schwach wechselfeucht charakterisiert.

Bei Versuchsbeginn handelte es sich um einen geringwüchsigen Kiefernbestand mit einzelnen unterständigen Fichten und Lärchen. Mäßige Durchforstungen wurden 1965, 1971 und 1984 durchgeführt. 1979 erfolgte eine starke Durchforstung zur Stammzahlgleichstellung.

2.2.2.3 Versuchsanlage und Meliorationsverfahren

Die Anlage des Versuchs ist aus Abb. 2 zu ersehen. Der Versuch weist die drei Versuchsglieder

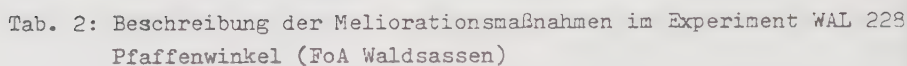
O = Kontrolle

I = Kalkstickstoff (KSt)

II = Kalkammonsalpeter (KAS)

in zweifacher Wiederholung mit Parzellengrößen von je 0,15 ha (30x50 m) auf und ist durch Winkelgräben und Pflöcke markiert. Die Parzellen sind jeweils 5 m voneinander entfernt. Das Areal ist eingezäunt.

Tab. 2 zeigt Art, Menge und Zeitpunkt der Düngungsmaßnahmen.



Thomas-P = Thomasphosphat
KSt = Kalkstickstoff
KAS = Kalkammonsalpeter

2.2.3 Versuch Archenohe

2.2.3.1 Ziel des Versuches

Im vorliegenden Versuch handelt es sich um eine Meliorationsmaßnahme zur Bestandesneubegründung, die von Dr. SCHÖDEL, Regierungsforstamt Regensburg und Prof. Dr. ROHMEDEK, Institut für Forstsamenkunde und Pflanzenzüchtung der damaligen Forstlichen Forschungsanstalt München angelegt wurde. Das Ziel dieses Versuches war, durch Anbau von Weißerlen sowie Ansaat der Dauerlupine das durch Streunutzung reduzierte Bodenkapital an Stickstoff zu erhöhen sowie den gesamten Humus- und Nährstoffhaushalt durch Förderung des biologischen Bodenzustandes zu verbessern. Im Gegensatz zu den damals praxisüblichen Meliorationsverfahren war ein Unterbau mit weiteren Laubbaumarten und Kiefer erst nach Bestandesschluß der Erlen geplant. In der Folge unterblieb jedoch dieser Unterbau ebenso wie weitere waldbauliche Eingriffe.

Forschungsergebnisse hierzu wurden von KÖSTLER und SOMMER (1962), SCHULTE-UEBBING (1982), MAKESCHIN (1983) und ERUZ et al. (1985) vorgelegt.

2.2.3.2 Standort und Bestandsmerkmale

Die Versuchsfläche gehört zum südlich von Waldsassen liegenden Distrikt XII Hammerholz, Abt. VII/56 "Archenohe" des FoA Waldsassen und liegt in fast ebener Position in einer Höhe von 465 m über NN. Der Versuch wurde im Winter 1954/55 in einem damals ca. 100 Jahre alten Kiefer-Fichten-Baumholz V. Bonität auf einer ehemals streugenutzten Podsol-Braunerde aus schluffiger Phyllit-Verwitterung begründet. Nach Kahlschlag und Stockrodung wurde die gesamte Fläche unterteilt: auf einer Teilfläche erfolgte ein Abräumen von Rohhumus und Bodenvegetation bis zum Mineralboden. Diese Straten wurden auf die unmittelbar benachbarte zweite Teilfläche verbracht. Beide Parzellen wurden anschließend gekalkt, vollumgebrochen, mit Weißerle bepflanzt und mit Dauerlupine eingesät.

Waldbauliche Maßnahmen unterblieben sowohl im Kiefer-Fichten-Altholz als auch auf den Erlenflächen.

2.2.3.3 Versuchsanlage und Meliorationsverfahren

Die Versuchsanlage ist in Abb. 3 dargestellt. Der Versuch besteht aus drei Flächen (Kiefernvergleichsfläche, Erle 0 und Erle 1), je Fläche 30x30 m, die Behandlungen sind nicht wiederholt.

Ki = Kiefernvergleichsfläche

E₀ = Erle ohne Auflagehumus

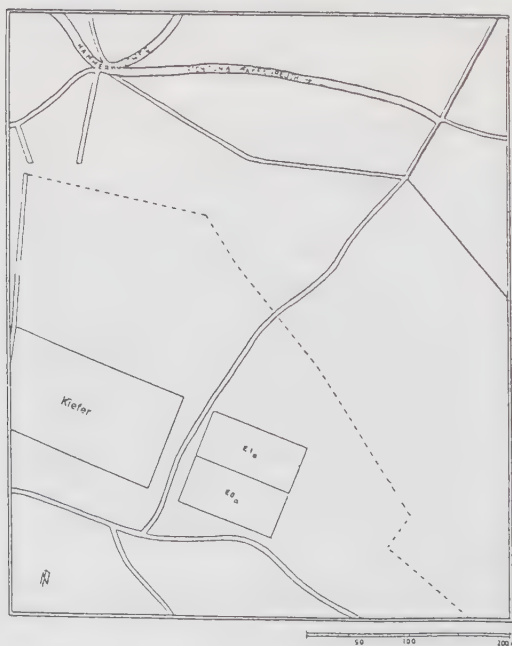
E₁ = Erle mit doppeltem Auflagehumus.

Beide Erle-Varianten befinden sich auf zusammenhängenden, unmittelbar benachbarten Flächen, während die Vergleichsfläche etwa 50 m entfernt liegt. Die Flächen stehen nicht unter Zaunschutz.

Die vorliegende Untersuchung bezieht sich auf die sogenannte Kiefernvergleichsfläche (Ki) und die Fläche Erle 1. Die Parzelle E₀ wurde in die vorliegenden Untersuchungen nicht einbezogen.

In Tab. 3 sind die durchgeführten Meliorationsmaßnahmen dargestellt.

Abb. 3: Darstellung der Versuchsanlage "Archenohe"



Tab. 3: Beschreibung des Meliorationsversuches "Archenohe"

Termin	Versuchsglied Erlenflächen	
	E 0	E 1
Winter 1954/ Frühjahr 1955	Kahlschlag des Kiefern-/Fichten-Altholzes und Stockrodung a) Umlagerung von Auflagehumus und Bodenflora von Fläche E0 auf Fläche E1 b) Kalkung mit 50 dt CaCO₃/ha c) Vollumbruch d) Kalkung mit 50 dt CaCO₃/ha e) Bepflanzung mit einjährigen Weißerlen (6450/ha) Einsatz von Dauerlupine (8 kg/ha)	

2.2.4 Versuch Großdick

2.2.4.1 Ziel des Versuches

Bei diesem sogenannten Waldbracheversuch handelt es sich nicht um einen wissenschaftlichen Versuch im engeren Sinne, sondern um verschiedenartig meliorierte Flächen der Praxis, die vom damaligen Amtsvorstand des Forstamts Waldsassen, Forstmeister DIEPOLD, Ende der 40er und zu Beginn der 50er Jahre angelegt wurden. Nach Auffassung von FM Diepold war eine nachhaltige Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit nur durch eine längere Bodenruhe (und damit Verzicht auf wertvolle Holzproduktion) zu erreichen. Diese Waldbrache wurde in örtlich wechselndem Ausmaß unterstützt durch hohe Kalkung, Anbau von meliorierenden Pflanzen der Bodenvegetation, Unterbau von Edellaubbaumarten sowie vereinzelt auch das Ausbringen von Teichschlamm. Die Flächen blieben in der Regel mit einem lichten Kiefernschirm bedeckt.

Obwohl im Einzelfall die durchgeführten Meliorationsmaßnahmen nicht mehr detailliert rekonstruiert werden können, wurden einige dieser Flächen in die bodenkundlichen Auswertungen einbezogen, zudem die

langfristigen Wirkungen auf vergleichbarem Substrat im selben Wuchsbezirk einen interessanten Vergleich mit den anderen Meliorationsverfahren erwarten ließen.

2.2.4.2 Standort und Bestandsmerkmale

Die Meliorationsmaßnahmen wurden im Zeitraum 1951-1960 im FoA Waldsassen Distr. Pfuderforst VII Abt. 1 bzw. 10 Großdick/Grundelhüll in einem damals etwa 50jährigen Kiefern-Baumholz durchgeführt.

Das Experiment liegt in etwa 581 m über NN in fast ebener Position auf tiefgründigen, sauren, podsoligen Braunerden aus Phycodenschiefer-Phyllitizersatz (DIEPOLD, 1948).

2.2.4.3 Versuchsanlage und Meliorationsmaßnahmen

Die Lage der Versuchsfläche ist aus Abb. 4 zu ersehen. Der Versuch weist die vier Prüfglieder

Ki = Kiefervergleichsfläche
MW3 = Mischwald (Ki-Edellaubbaumarten)
MW4 = Mischwald (Ki-Bu-Edellaubbaumarten)
Bi = Birke (mit Lärchen-Überhältern)

in zweifacher Wiederholung mit Parzellengrößen von je 0,12 ha (30x40 m) auf. Das Areal ist nicht eingezäunt.

Die durchgeführten Maßnahmen können nicht mehr im Detail rekonstruiert werden. Folgende Eingriffe sind wahrscheinlich:

- Starke Lichtung der Kiefer im Baumholzalter
- Einbringung von Kalk, Phosphat und/oder Teichschlamm
- z. T. flache, mechanische Bodenbearbeitung von Hand
- Pflanzung von Bergahorn, Spitzahorn, Winterlinde, Hainbuche, Buche, ergänzt durch Ansaat von Gräsern und Kräutern
- Einsaat von Dauerlupine (6 kg/ha).

Abb. 4: Darstellung der Versuchsanlage Großdick



GRONDICK/GRÜNDELHÜLL

3. Methodik

3.1 Bodenuntersuchungen

3.1.1 Probenahme im Gelände

3.1.1.1 Entnahme der organischen Auflage

Für die organische Auflage erfolgte die Probenahme getrennt nach L- und F+H-Lage. Die Proben wurden mittels Stechrahmen (20x20x10 cm) entnommen, Pflanzenteile größer als 2 cm sowie lebende Pflanzen (Gras, Moose, Wurzeln) dabei sorgfältig entfernt. Je Parzelle wurden 20 Entnahmepunkte flächenrepräsentativ (Gitternetz) vermessen. Jeweils fünf Einzelproben wurden anschließend nach einem festgelegten Muster zu einer Mischprobe vereinigt.

3.1.1.2 Entnahme der Mineralbodenproben

- für pH-Werte, Gesamtgehalte an Bioelementen u. KAK-Bestimmung

Im Mineralboden (bis 30 cm Tiefe) wurden die Proben volumengerecht mit einem Spezialbohrer (Ø 5 cm, VÖLKL 1983) entnommen und in 10 cm-Lagen getrennt. Die Mischproben wurden nach dem gleichen Muster wie für die organische Auflage zusammengestellt.

- für Gleichgewichtsbodenlösung- und 2:1-Wasserextrakt-Analysen

Die Entnahme der Proben zur Untersuchung der Gleichgewichtsbodenlösung und des Wasserextrakts erfolgte im April, Juli und Oktober 1984. Je Parzelle wurden mittels 10 Einstichen mit dem Spezialbohrer bis 30 cm Tiefe Proben entnommen. Die jeweils korrespondierenden 10 cm-Lagen wurden zu je einer Mischprobe pro Parzelle vereinigt.

Die weitere Verarbeitung der Proben erfolgte wie unter 3.1.6.2 beschrieben.

3.1.2 Aufbereitung der Bodenproben

3.1.2.1 Trocknen und Sieben

Auflagehumus- und Mineralbodenproben wurden im Umluft-Trockenschrank (ULTS) bei 65 °C über 72 Stunden vorgetrocknet und anschließend die organische Auflage von Hand in Großpartikel >2 mm und Feinanteil <2 mm gesiebt. Die Mineralbodenproben wurden nach Zerstörung der Aggregate im Mörser von Hand ebenfalls in Feinerde <2 mm und Skelett gesiebt. Die endgültige Trocknung erfolgte für die Mineralbodenproben im ULTS bei 105 °C über 48 Stunden.

3.1.2.2 Wiegen und Mahlen

Die Mischproben wurden vor und nach dem Trocknen zur Bestimmung des Skelett- und Feinbodenanteils ausgewogen, der Skelettanteil verworfen, ein Teil der Proben (< 2 mm) anschließend in der Scheibenschwingmühle staubfein gemahlen. Sowohl die gemahlene als auch die ungemahlene Proben wurden in verschließbaren 100 ml-Gläsern bzw. 1 l-Flaschen verpackt und trocken aufbewahrt.

3.1.3 Bestimmung von pH, C_{org} , N_t

3.1.3.1 Bestimmung von pH (H_2O), pH ($CaCl_2$) und pH (KCl)

Je 10 g ungemahlener und getrockneter Boden der Mineralbodenproben wurden mit 25 ml H_2O , 25 ml 0,01 M $CaCl_2$ -Lösung oder 25 ml 1 N KCl versetzt. Unter mehrmaligem Umrühren blieben die Bodensuspensionen 2 Stunden stehen. Danach wurde in der Bodensuspension der pH-Wert elektrometrisch bestimmt. Die pH-Bestimmung für die org. Auflagen erfolgte entsprechend mit einem Substrat-Lösungsverhältnis von 1:10.

3.1.3.2 Kohlenstoffbestimmung

Die Bestimmung der Gehalte an organisch gebundenem Kohlenstoff erfolgte mit dem Caromat der Firma Wösthoff, Bochum (Wösthoff OHG, Apparatebau).

Bei den gemahlenden Proben betrug die Einwaage für die Tiefenstufe 0-10 cm des Mineralbodens 1 g, bei Tiefen >10 cm 2 g. Von den Auflageproben genügten 0,2 g, die mit geglühtem Quarzsand fein überdeckt wurden, um Verpuffungen zu vermeiden. Geeicht wurde das Gerät bei den Mineralbodenproben mit Calciumcarbonat, in den Auflageproben mit Glucose.

3.1.3.3 Stickstoffbestimmung (Gesamt-N) nach KJELDAHL

Die Stickstoffbestimmung erfolgte nach KJELDAHL (SCHLICHTING und BLUME, 1966; FASSBENDER, 1977). Die Einwaagemengen betrugen für Humusaufgabeproben 0,5 g, für Mineralbodenproben je 2,0 g.

3.1.4 Gesamtaufschlußmethode (HF/HClO₄)

3.1.4.1 Prinzip der Methode

Beim Gesamtaufschluß-Verfahren werden die mineralisch gebundenen Elemente (außer Si) durch Lösung mit Flußsäure freigesetzt. Durch Zusatz von Perchlorsäure werden außerdem die organisch gebundenen Elemente aufgeschlossen. Diese Methode kennzeichnet pauschal die gesamten, im Boden vorhandenen Nährstoffreserven, erlaubt aber nur bedingt eine Aussage über deren Verfügbarkeit.

3.1.4.2 Durchführung der Analysen

0,2 g gemahlene Feinerde werden in einen 30 ml-Platin-Tiegel eingewogen und mit etwas Wasser befeuchtet. Humusreiche Proben werden vor dem Befeuchten 1 h bei 500 °C im Muffelofen geglüht. Anschließend werden 5 ml 40 %ige HF und 0,5 ml HClO₄ zugegeben. Die Tiegel werden zu 9/10 mit einem Platin-Deckel abgedeckt und auf dem Sandbad unter dem Abzug bei 200-220 °C bis zur Trockne abgeraucht. Nach dem Abkühlen werden 10 ml 5 N HCl zugegeben, der Tiegelinhalt kurz aufgeköcht und anschließend in einen 100 ml-Meßkolben überführt.

Die Aufschlußlösungen werden weiter auf folgende Elemente untersucht:

- Gesamt-Phosphor, kolorimetrisch nach der Molybdänblau-Reaktion und Messung am Spectralphotometer bei 830 nm (Perkin-Elmer)
- Gesamt-Natrium/Kalium am Flammenphotometer (Eppendorf)
- Gesamt-Calcium/Magnesium am Atomabsorptionsspectrophotometer (Perkin-Elmer, Modell 380) nach Markierung von Störionen mit Strontiumchlorid
- Gesamt-Aluminium, -Eisen, -Mangan am AAS Perkin-Elmer 380 direkt aus der Aufschlußlösung.

3.1.5 Bestimmung der effektiven Kationenaustauschkapazität nach der Perkolationsmethode (1 M NH_4Cl) und nach der Extraktionsmethode (0,5 M NH_4Cl)

3.1.5.1 Prinzip der Methode

Bei der Bestimmung der effektiven KAK wird durch die Ermittlung aller quantitativ wichtigen austauschbaren Kationen der den Pflanzen kurz- und mittelfristig zur Verfügung stehende Vorrat dieser Ionen im Boden ermittelt. Die prozentuale Zusammensetzung der ausgetauschten Kationen erlaubt Rückschlüsse auf den chemischen Bodenzustand; eine aussagekräftige Kenngröße ist dabei die Basensättigung, d. h. der prozentuale Anteil der Alkali- und Erdalkalitionen an der Gesamtaustauschkapazität.

Die effektive Austauschkapazität ergibt sich aus der Summe der basisch wirksamen Kationen Ca, Mg, K und Na und der Menge an sauer wirkenden Kationen (Al, Fe, H, Mn). Da sich das vorliegende Bodenmaterial im sauren Bereich befindet, eignet sich die NH_4Cl -Lösung zur Bestimmung der austauschbaren Kationen in carbonatfreien Böden. Die Kationen werden bei annähernd bodeneigenem pH-Wert ausgetauscht, da die NH_4Cl -Lösung ungepuffert ist und nach MEIWES et al. (1984) selbst einen pH-Wert von 4,1-4,6 hat.

Das Prinzip der Methode liegt darin, daß die austauschbar gebundenen Kationen des Bodens gegen NH_4 -Ionen ausgetauscht werden.

Der Unterschied zwischen beiden Methoden besteht darin, daß bei der 1 M NH_4Cl -Lösung der ULRICH-Methode (ULRICH, 1966) der Austausch

durch Perkolation erfolgt, während der Austauschvorgang bei der Methode TRÜBY (TRÜBY 1984) mit 0,5 M NH_4Cl -Lösung sich ein Gleichgewichtszustand zwischen Austauscher und Lösung mittels Extraktion einstellt.

3.1.5.2 Bestimmung der effektiven KAK nach der Perkulationsmethode

In 100 ml-Erlenmayer-Kolben werden 5 g Auflagehumus bzw. 10 g Mineralboden (beide nicht gemahlen) eingewogen und 50 ml 1 M NH_4Cl -Lösung zugegeben. Die Kolben werden mit einem Gummistopfen verschlossen, kurz und kräftig geschüttelt und über Nacht stengelassen. Am nächsten Tag werden die Kolben eine Stunde lang maschinell geschüttelt, anschließend der Inhalt in ein Glaszylinderröhrchen überführt. Im Glaszylinder befindet sich über den Fritten eine fest angedrückte Schicht Filterflockenmasse (1 g), darüber 10 g geglühter Quarzsand.

Sind nach dem Überführen die ersten 50 ml in den 250 ml-Kolben getropft, werden weitere 10 g Quarzsand in den Glaszylinder gegeben (besonders wichtig bei tonigem Boden). Weiterhin werden 4mal je 50 ml 1 M NH_4Cl -Lösung zugegeben, und die Perkolation mit NH_4Cl wird bis zum Erreichen der Meßkolbenmarke (250 ml) fortgeführt.

In gleicher Weise laufen jedesmal Blindwerte ohne Boden mit, um mögliche Verunreinigungen des NH_4Cl und des Quarzsandes berücksichtigen zu können.

3.1.5.3 Bestimmung der NH_4Cl -extrahierbaren Kationen durch Extraktion und Schüttelextraktion

- Extraktion

In 100 ml-Erlenmayer-Kolben werden 2,5 g lufttrockene Feinerde (Mineralboden) eingewogen und 50 ml 0,5 M NH_4Cl -Lösung zugegeben. Die Kolben werden von Hand kräftig geschüttelt und über Nacht stengelassen. Am nächsten Tag werden sie erneut aufgeschüttelt, danach läßt man den Boden absetzen. Die überstehende Lösung wird dekantiert und der Rückstand erneut mit 50 ml NH_4Cl -Lösung versetzt und aufgeschüttelt. Beide Fraktionen werden gefiltert und in Meßkolben überführt (P. TRÜBY und E. ALDINGER, mündliche Mitteilung).

- Schüttelextraktverfahren

In 100 ml-Zentrifugenbecher wurden 1,25 g Auflagehumus bzw. 2,5 g Mineralboden (beide gesiebt und nicht gemahlen) eingewogen und 100 ml 0,5 M NH_4Cl -Lösung zugegeben. Die Zentrifugenbecher wurden verschlossen, von Hand kräftig geschüttelt und über Nacht stehen gelassen. Am nächsten Tag wurden die Becher eine Stunde lang horizontal maschinell geschüttelt und der Extrakt 30 Minuten bei 3000 U/min. zentrifugiert. Nach kurzem Absetzenlassen wurde der Lösungsextrakt über einen Blaubandfilter und durch einen Glas-trichter mit Langhals (70 mm $\varnothing$) in einen 100 ml-Meßkolben filtriert.

3.1.5.4 Durchführung der Analysen

Die Bestimmungen im Perkolat oder Extrakt erfolgten für Na, K mittels Flammenphotometer (Eppendorf), von Mg, Ca, Fe, Al und Mn mittels Atomabsorptionsspektrophotometer (Perkin-Elmer). Bei der Ca- und Mg-Bestimmung wurde zur Kompensation von Störungen SrCl_2 1,5 % zugesetzt. Die Eichlösungen werden je nach Methode in 1 M oder 0,5 M NH_4Cl -Lösung vorbereitet (Merck-Art. 1145). Bei den Bestimmungen von Na, K, Fe, Mn und Al wurden die Perkolate oder Extrakte je nach Konzentration und Stabilität der Messung am Gerät oft mit destilliertem Wasser im Verhältnis 1:1 verdünnt.

Die Messung des pH-Wertes erfolgte in der 1 M- oder 0,5 M NH_4Cl -Lsg. vor und nach der Perkolation bzw. Extraktion mittels Glaselektrode. Es wurden jeweils 25 ml Lösung in ein Becherglas überführt, umgerührt (Magnetrührer) und gemessen.

Die H-Ionen-Konzentration wurde für beide Methoden aus pH-Wert und Austausch-Al-Konzentration errechnet (MEIWES et al., 1984). In der Regel sollten nach der TRÜBY-Extraktionsmethode Al und H mit NaOH titriert werden. Die Endpunktindikation erfolgt potentiometrisch mit einem Metrohm-Titroprozessor, der zur Zeit am Lehrstuhl nicht vorhanden ist. Die H-Berechnung (nach ULRICH) als Teil der TRÜBY-Methode ist nur als Übergangslösung zu betrachten, um die Ergebnisse mit denen der ULRICH-Methode vergleichen zu können.

Die Bestimmung von H und Al kann auch durch Titrimetrie erfolgen,

wobei 25 ml des unverdünnten Perkolats in ein Becherglas pipettiert und mit einem Aliquot von 0,05 N NaOH (bei geringeren Konzentrationen mit 0,025 N NaOH) am Titrierautomat auf pH 7 titriert werden. Um den Verbrauch an 0,05 N bzw. 0,025 N NaOH zu bestimmen, werden 250 ml der Austauschlösung als Blindwert in derselben Weise behandelt. Die Berechnung des Verbrauchs an NaOH wird unter Punkt 3.1.5.5 erklärt (siehe Formel 5 und 6).

3.1.5.5 Berechnung

Die Berechnung des Gehalts an austauschbaren Kationen erfolgt nach folgenden allgemeinen Formeln:

(1) Elementgehalt K, Na (mmol IÄ/100 g) =

$$\text{Skt} \times \frac{\text{Faktor Verdünnung} \times \text{ml Perkolat o. Extrakt} \times \text{Faktor Einwaage}}{\text{Faktor Konversion 1000 (in mval)} \times \text{Äq.Gew. (K, Na)}}$$

(2) Elementgehalt Mg, Ca, Al, Mn, Fe (mmol IÄ/100 g) =

$$\text{mg/ml} \times \frac{\text{Faktor Verdünnung} \times \text{ml Perkolat o. Extrakt} \times \text{Faktor Einwaage}}{1000 - \text{Äq.Gew. Element}}$$

(3) mg/ml = Extinktion x Faktor Eichkurve

Skt = Skalenanteil

Äq.Gew. = Äquivalent-Gewicht

$$(4) C_H \text{ (mmol IÄ/100 g)} = \frac{(10^{-\text{pHp}} - 10^{-\text{pHo}}) \times 10^5 \times l}{0,88 \times G} - \frac{c_{\text{Al}}/3}{1 + \frac{10^{-\text{pHp}}}{10^{-5,85}}}$$

pHp = pH-Wert des Perkolats

pHo = pH-Wert der Perkolationslösung (Blindwert)

c_{Al} = Gesamte molare Al-Konzentration im unverdünnten Perkolat

G = eingewogene Probe in Gramm

l = Lösungsmenge

(5) Verbrauch an 0,05 N (0,025 N) NaOH = Titrationswert - Blindwert

(6) Berechnung H + Al =

Verbrauch x 0,05 (0,025) x ml Perkolat x Faktor Einwaage

3.1.6 Bestimmung der Ionenkonzentration in der Gleichgewichtsbodenlösung (GEL)

3.1.6.1 Prinzip der Methode

Die Gleichgewichtsbodenlösung (GEL) ist der Sättigungsextrakt (RICHARDS, 1954), bei dem dem Boden soviel Wasser zugesetzt wird, daß unter Rühren gerade eine Suspension entsteht. Diese bleibt unter gelegentlichem Rühren 24 Stunden stehen, um einen gleichgewichtsnahen Zustand zu erreichen.

Bei der Bestimmung aller quantitativ wichtigen, löslichen Kationen und Anionen in der GEL wird der den Pflanzen aktuell zur Verfügung stehende Vorrat dieser Ionen ermittelt. Bis zu einer Lösungs/Bodenrate von 0,8 ml/g sind die Verhältnisse der Kationen untereinander annähernd konstant (ULRICH u. KHANNA 1972). Dagegen nehmen die Konzentrationen der leicht löslichen Chloride, Nitrate und Sulfate mit zunehmendem Wasserzusatz ab (MEIWES et al., 1984).

3.1.6.2 Aufbereitung der Bodenproben

Das gesamte Probenmaterial wurde in feldfrischem Zustand ins Labor gebracht und dort bis zur Analyse tiefgefroren, da aufgrund der hohen Probenzahl (100 pro Termin) eine sofortige Weiterverarbeitung unter vergleichbaren Bedingungen nicht möglich gewesen wäre.

Zur Analyse wurden die tiefgefrorenen Mischproben aufgetaut und von Hand homogenisiert, dabei Steine und Wurzeln sorgfältig entfernt.

Ein Teil der Mischproben wurde wie unter 3.1.1.2 beschrieben weiterverarbeitet, ein weiterer Teil im Trockenschrank bei 65 °C getrocknet und für den 2:1-Wasserextrakt aufbereitet.

3.1.6.3 Durchführung der Analysen

Unmittelbar nach Auftauen erfolgte an 25 g Bodenmaterial die Ermittlung der Trockenmasse (24 h trocknen bei 105 °C). Anschließend wurde eine Frischmasse eingewogen, die 200 g Trockengewicht entsprach, in

einem 1 l-Plastikbecher mit H_2O soweit angefeuchtet, daß der Boden mit einem Spatel knetbar war und die Bodenpaste glänzte. Ein Wasser/Bodenverhältnis von 0,7-0,8 ml/g darf dabei nicht überschritten werden. Die Paste wurde 24 Stunden bei Zimmertemperatur stehengelassen und zwischendurch mehrmals mit einem Spatel umgerührt. Nach 24 Stunden wurde die gesamte wässrige Mischung in einen Zentrifugenbecher gefüllt und zentrifugiert (humusreicher Boden 1 Stunde und humusarmer Mineralboden 30 Minuten bei 3000 U/min.). Danach erfolgte über einen Membranfilter (0,45 μm) die Filtration. Bei Lösungen, die nicht ganz frei von Trübungen waren, wurden weitere 30 Minuten zentrifugiert.

In der GBL wurden folgende Kationen und Anionen gemessen:

H, Na, K, Mg, Ca, Al, Mn, Fe, NH_4 , NO_3 , SO_4 , Cl. Der pH-Wert wurde mit der Glaselektrode bestimmt; H dabei delogarithmiert und errechnet. Na und K wurden mittels Flammenphotometer, Ca, Mg, Al, Mn und Fe mittels Atomabsorptionsspectrophotometer (AAS) bestimmt, Ca, Mg nach Markierung von Störionen mit Strontiumchlorid (1,5 %).

Folgende Ionen wurden photometrisch im kontinuierlichen Durchlaufverfahren (Auto-Analyser) bestimmt: NH_4 mittels Na-Salycilat und Na-Dichlorcyanurat, NO_3 nach Reduktion zu NO_2 mit Sulfanilamid und Naphtyl-äthylendiamin-dihydrochlorid, Cl mittels Quecksilber-thiocyanat, Sulfat mittels Methyl-Thymolblau.

Die Eichlösungen wurden in destilliertem Wasser hergestellt.

3.1.7 Bestimmung der H_2O -extrahierbaren Ionen (2:1-Wasserextrakt)

3.1.7.1 Prinzip und Durchführung der Methode

Die 2:1-Wasserextraktion wurde bisher besonders bei der Ermittlung der Ionenverhältnisse sowie der Bestimmung kurzfristig verfügbarer Kationen angewendet.

35 g des getrockneten und gesiebten Bodens (siehe 3.1.2.1) wurden mit 70 ml deionisiertem Wasser im Verhältnis 1:2 versetzt und 24 Stunden in der Schüttelmaschine horizontal geschüttelt, zentrifugiert (30 min. bei 3000 U/min.), und die Lösung über einen Membran-

filter (0,45 μm) gefiltert.

Es wurde die gleiche Methodik wie im Punkt 3.1.6.3 angewendet. Die analytischen Bestimmungen der Kationen im Wasserextrakt entsprechen dem Verfahren der GBL-Methodik.

3.2 Nadelanalysen

3.2.1 Entnahme der Nadelproben

Die Nadelentnahme erfolgte für die Versuche WAL 234 und WAL 228 im Herbst eines jeden Jahres auf allen Parzellen von jeweils 15-20 herrschenden Bäumen. Die halbjährigen Triebe aus den obersten Wirteln der Kronenspitze wurden bei 65 °C im Trockenschrank getrocknet, anschließend abgenadelt, fein gemahlen, homogen gemischt, und die hergestellten Mischproben in Plastikbehältern aufbewahrt.

Die Analysen wurden vom Personal des Instituts durchgeführt.

3.2.2 Chemische Analytik

2 g fein gemahlene und getrocknete Pflanzensubstanz wurden in getrocknete Quarzschälchen bekannten Gewichtes eingewogen. Die Schälchen wurden in einen Muffelofen gestellt und die Temperaturen langsam auf 500-600 °C gebracht. Nach der Veraschung über Nacht und Abkühlung im Exikator wurden die Quarzschälchen + Asche gewogen und der prozentuale Aschengehalt bezogen auf Nadeltrockenmasse errechnet. Der Rückstand wurde gelöst und gefiltert. Das Überführen der Asche erfolgte in 2 %ige HCl-Lösung (0,05 mol/l).

Direkt aus der Aschenlösung wurden folgende Elemente bestimmt:

P nach der Molybdänblau-Methode (kolorimetrisch), Ca, Na und K flammenphotometrisch, Mg, Cu, Mn, Al und Fe atomabsorptionsspektrophotometrisch.

N wurde nach KJELDAHL bestimmt.

3.3 Ertragskundliche Untersuchungen

Die ertragskundlichen Grund- und Anschlußaufnahmen wurden vom Lehrstuhl für Waldwachstumskunde und von der Bayerischen Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt München erhoben. In Verbindung mit den Aufnahmen erfolgten zumeist mäßige Durchforstungen, die sich überwiegend auf den ZE-Anfall bezogen. Bei allen Aufnahmen wurden die Durchmesser der Bäume mit einem Stahlbandmaß mit Durchmesser-
teilung ermittelt und etwa 40 Höhen je Parzelle gemessen (REHFUEß und SCHMIDT, 1971). Das Baumalter gefällter Bäume wurde durch Jahres-
ringzählung überprüft, die Höhe mittels Bandmaß ermittelt. Außerdem wurden je Aufnahme zwei Bäume gefällt und zu Stammanalysen weiter untersucht.

Die für die Interpretation der Versuche in erster Linie interessanten Zuwachswerte sind als Differenzen der Grundflächen und Volumina zweier Aufnahmen bestimmt worden. Der ausscheidende Bestand wurde dabei berücksichtigt.

Nach der Aufnahme 1979 im Versuch WAL 234 sorgte eine starke Durchforstung für Stammzahlgleichstellungen ($N = 750$ Bäume/ha) nach einem verbesserten Versuchskonzept, das künftig den Vergleich zwischen den Düngungsvarianten erleichtern soll.

3.4 Statistische Auswertung der Daten

3.4.1 Angewendete Programme

Die Meßdaten wurden am Großrechner System IBM des Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten ausgewertet.

Gerechnet wurde mit dem Biomedical Data Program (EMDP), University of California (1983). Es wurden im einzelnen folgende statistische Programme angewendet:

- a) Einfache Datenbeschreibung (P1D)
- b) Analyse gruppierter Daten (P7D)
- c) multiple lineare Regression (P1R)
- d) Schrittweise Diskriminanzanalyse (P7M)

3.4.2 Darstellung der Ergebnisse

Die Tabellen enthalten die Mittelwerte; soweit es für notwendig und statistisch möglich erachtet wurde, sind auch die Standardabweichungen und die Ergebnisse der statistischen Sicherung durch F- und T-Test angegeben.

Mit Symbolen gekennzeichnete Signifikanzniveaus entsprechen folgenden Irrtumswahrscheinlichkeiten des F-Tests. Dabei bedeutet:

*	$0,05 \geq P > 0,01$	$P = 95,0 \%$ einfach signifikant
**	$0,01 \geq P > 0,001$	$P = 99,0 \%$ doppelt signifikant
***	$P < 0,001$	$P = 99,9 \%$ dreifach o. hoch signifikant

Außerdem sind die Unterschiede zwischen den Mittelwerten gruppiert, soweit ein Signifikanzniveau von $P = 95,0 \%$ überschritten wird. Die Gruppierung erfolgt mittels kleiner Buchstaben. Dabei wurden a, b, c und d für Unterschiede innerhalb einer Tiefenstufe zwischen den Varianten und für Differenzen zwischen den Methoden und Terminen derselben Variante verwendet.

Statistisch gesicherte Werte sind dabei durch ungleiche Buchstaben oder -Kombinationen gekennzeichnet, statistisch nicht gesicherte Werte durch die gleichen Buchstaben oder -Kombinationen.

Auf größere Tabellen wurde möglichst zugunsten von Graphiken verzichtet. Die Tabellen befinden sich hauptsächlich im Anhang mit dem gesamten Datenbasismaterial.

3.4.3 Abkürzungen in Tabellen und Graphiken

In den Tabellen und Graphiken werden für die Versuchsglieder folgende Abkürzungen verwendet:

Ko	= Kontrolle für Parzellen der Versuche 228 (2) und 234 (3)
Vo	= Volldüngung für Parzellen des Versuchs 234 (3)
Lu	= Lupinenunterbau für Parzellen des Versuchs 234 (3)
KAS	= Kalkammonsalpeter für Parzellen des Versuchs 228 (2)
KSt	= Kalkstickstoff für Parzellen des Versuchs 228 (2)
Ki	= Kontrollvariante für die Kiefernparzellen des Versuchs Archenohe

- Er = meliorierte Erlenflächen des Versuchs Archenohe
Ki_{1,2} = Kontrollvariante für Parzellen des Versuchs Großdick (2)
MW_{3,4} = Mischwaldvariante für Parzellen des Versuchs Großdick (2)
Bi_{1,2} = Birke-Variante für Parzellen des Versuchs Großdick (2)
So = Prozentanteil sonstiger Elemente wie Na, K, Mn an der KAK

4. Ergebnisse der Voruntersuchungen

Unter dem Begriff "Voruntersuchungen" wird in dem vorliegenden Kapitel über eine Reihe von methodischen Tests berichtet, die für ein bestimmtes Verfahren mit beschränktem Probenmaterial durchgeführt wurden. Der Vergleich zwischen den Ergebnissen verschiedener Methoden erfolgt später.

4.1 Methodische Voruntersuchungen zur Bestimmung der effektiven KAK durch Perkolation und Extraktion

Diese Voruntersuchung sollte einerseits klären, welche Ergebnisse beide KAK-Methoden liefern. Zum anderen dienten sie dazu, die methodischen Probleme beider Methoden zu erkennen und zu beseitigen.

Für die Perkulationsmethode wurden folgende Fragen untersucht:

- a) Perkulationsverhalten der Bodenproben
- b) Einfluß der Molarität der NH_4Cl -Lösung (1 M oder 0,5 M)
- c) Einfluß von unterschiedlichen Mengen an NH_4Cl -Lösung für die Perkolation auf die Meßergebnisse
- d) Bestimmung von H^+ -Ionen durch Titration und durch Berechnung über den pH-Wert.

Für die Extraktionsmethode wurden Tests zu folgenden Gesichtspunkten durchgeführt:

- a) Standardisierung der Extraktion und Sedimentation
- b) Filtrationsstörungen
- c) Vergleich mit anderen Extraktionsmethoden zur Bestimmung der KAK.

4.1.1 Methodische Voruntersuchungen zur Perkulationsmethode

- a) Reproduzierbarkeit des Perkulationsvorgangs

Bei Durchführung von Perkulationsuntersuchungen an Auflagehumus- und Mineralbodenproben waren sowohl bei verschiedenartigem Probenmaterial als auch bei Parallelproben z. T. erhebliche Differenzen

der Perkulationszeiten aufgefallen. Besonders problematisch war die Feinregulierung der Tropfgeschwindigkeit. Beim Auflagehumus lief das Perkolat aufgrund der hohen Porosität zu schnell und zu unregelmäßig durch (4-6 h). Bei den Mineralbodenproben dagegen kam es aufgrund des relativ hohen Schluff- und Tonanteils zu häufigen Verstopfungen, wodurch sich die Perkulationszeiten verlängerten (8-10 h).

Um festzustellen, inwieweit sich verschiedenartige Perkulationszeiten auf die Analysenergebnisse auswirken, wurden für zwei Substrate (organische Auflage, gedüngt und ungedüngt, Versuch WAL 228) zwei Perkulationsläufe mit jeweils 8 und 4 Wiederholungen durchgeführt. In Tab. 4 sind die Ergebnisse dieses Tests aufgeführt.

Tab. 4: Test - Einfluß der unterschiedlichen Perkulationszeiten (1 = 4-6 h, 2 = 8-10 h) auf die Meßergebnisse (in mmol IÄ/100g) für zwei Auflagehumus-Proben aus dem Versuch WAL 228

Perz. :	ungedüngt				gedüngt			
	1. Vorgang		2. Vorgang		1. Vorgang		2. Vorgang	
	x	sx	x	sx	x	sx	x	sx
H	19,70	3,10	16,4	0,30	10,2	2,10	8,80	0,20
Al	6,50	0,60	5,40	0,30	3,20	0,10	2,30	0,00
Fe	0,81	0,05	1,01	0,04	0,58	0,02	0,81	0,05
Mn	0,23	0,01	0,29	0,01	0,74	0,03	0,95	0,03
Na	0,60	0,10	0,60	0,04	0,65	0,01	0,61	0,06
K	0,60	0,04	0,61	0,04	0,55	0,02	0,57	0,02
Ca	0,68	0,03	0,61	0,03	2,04	0,04	2,09	0,09
Mg	0,21	0,01	0,29	0,01	0,74	0,03	0,95	0,03

x = Mittelwert
sx = Standardabweichung

Die Meßergebnisse für H und Al weichen erheblich voneinander ab, wobei vermutlich auch Fehler des Titrationsverfahrens eine Rolle spielen. Für Na, K, Ca und eingeschränkt auch für Mg ergab sich dagegen gute Übereinstimmung. Die Differenzen für Fe und Mn sind tragbar. Bei einer Variation der Perkulationszeiten zwischen 4 und 6 Stunden, wie sie in unseren Serienanalysen auftrat, sind die Abweichungen ohnehin geringer.

b) Vergleichstest zur Molarität der NH_4Cl -Lösung (1 M und 0,5 M)

Dieser Test sollte klären, ob bei Einsatz desselben Bodenmaterials (4.1.1 a) die Konzentration der Austauschlösung halbiert werden kann, was große technische Vorteile für die Routine-Messungen an AAS und FFM hätte. Bisher waren Messungen an den beiden Geräten aufgrund von Salzverkrustungen an den Düsen oft problematisch und nicht einwandfrei. Durch Verwendung von 0,5 M NH_4Cl könnten diese Fehler deutlich vermindert werden.

Tab. 5: Vergleichstest zur Molarität der NH_4Cl -Lösung (mmol IÄ/100g)

Parz. :		ungedüngt		gedüngt	
Molarität		1 M	0,5 M	1 M	0,5 M
H	x	16,40	9,30	4,80	1,41
	sx	0,30	0,90	0,20	0,70
Al	x	5,40	6,80	2,30	2,40
	sx	0,30	0,08	0,00	0,04
Fe	x	1,00	0,76	0,81	0,60
	sx	0,04	0,04	0,05	0,03
Mn	x	0,29	0,20	0,95	0,90
	sx	0,01	0,01	0,03	0,03
Na	x	0,60	0,71	0,61	0,70
	sx	0,04	0,03	0,02	0,01
K	x	0,61	0,46	0,57	0,47
	sx	0,04	0,03	0,02	0,01
Ca	x	0,61	0,60	2,09	1,90
	sx	0,03	0,00	0,09	0,01
Mg	x	0,60	0,40	0,80	0,30
	sx	0,01	0,02	0,03	0,09

x = Mittelwert
sx = Standardabweichung

Die in Tab. 5 aufgeführten Ergebnisse lassen für die meisten Ionen keine einheitliche Abhängigkeit von der Molarität der Perkolutionslösung erkennen. Für H^+ , Fe, Mn, K und Mg konnten bei Perkolation mit 1 M NH_4Cl deutlich höhere Konzentrationen festgestellt werden; Ca zeigte keine eindeutige Tendenz; Al und Na wurden durch 0,5 M NH_4Cl sogar stärker ausgetauscht als durch 1 M NH_4Cl .

Eine deutliche Verbesserung der Meßqualität konnte allerdings beim Einsatz verdünnter Proben beobachtet werden. An beiden Meßgeräten schwankten die angezeigten Werte während des Meßvorgangs längst nicht

so stark wie bei Verwendung der konzentrierten 1 M NH_4Cl -Lösung. Für die Serienuntersuchungen wurde deshalb die Perkolation mit 1 M NH_4Cl -Lösung gewählt; die Perkolate wurden anschließend für die Messungen im Verhältnis 1:1 verdünnt.

c) Einfluß steigender Mengen an NH_4Cl -Lösung auf die Meßergebnisse

Es sollte geklärt werden, ob die Gesamtmenge an Perkolutionslösung (5 Zugaben von jeweils 50 ml 1 M NH_4Cl -Lsg.) reduziert werden kann und wieviele Ionen je Perkolationsschritt (insgesamt 5) ausgetauscht werden.

Von der gedüngten Parzelle 4 des Versuchs WAL 228 wurden aus dem Auflagehumus 8 Parallelen angesetzt. In 50 ml-Kolben wurden die jeweils aufgegebenen 50 ml aufgefangen und nach den obengenannten Methoden (siehe Punkt 3.1.5.2 und 3.1.5.4) analysiert. In Tab. 6 sind die Ergebnisse dargestellt.

Tab. 6: Einfluß steigender Mengen an NH_4Cl -Lsg. (1 M) auf die Meßergebnisse (mmol IÄ/100g Boden in jeweils 50 ml)

Perkolat	H	Al	Fe	Mn	Na	K	Ca	Mg
50 ml x	2,60	8,50	1,70	2,30	0,80	1,80	16,30	3,87
sx	1,40	0,60	0,09	0,50	0,08	0,80	1,98	0,50
100 ml x	3,60	5,80	1,10	1,20	0,50	0,80	3,50	1,60
sx	2,80	0,40	0,12	0,20	0,15	0,20	0,80	0,30
150 ml x	1,40	2,90	0,07	0,10	0,20	0,10	0,40	0,15
sx	0,90	0,30	0,09	0,09	0,04	0,03	0,01	0,09
200 ml x	-	2,80	0,46	0,04	0,20	0,08	0,10	0,02
sx	-	0,10	0,05	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01
250 ml x	-	1,60	0,34	-	0,10	0,06	0,05	0,06
sx	-	0,40	0,04	-	0,02	0,00	0,00	0,00

x = Mittelwert
sx = Standardabweichung

Für H^+ , K, Ca, Mg und Mn ist bereits nach 100-150 ml der größte Teil der insgesamt extrahierbaren Menge ausgetauscht. Dagegen müssen für Al und Fe mindestens 250 ml perkolieren, um einen vollständigen Austausch zu erreichen.

d) Vergleich zwischen der Bestimmung von H^+ durch Titration und der Berechnung der H^+ -Ionen-Konzentration aus dem pH-Wert

Mit Probematerial des Versuchs WAL 228 (jeweils 4 Parallelen) wurde auch ein Vergleich zwischen zwei Methoden zur Bestimmung der H^+ -Konzentration (Titrimetrie und Berechnung) angestellt (vgl. Kap. 3.1.5.4; 3.1.5.5 Formeln 4, 5 und 6).

Tab. 7: Vergleichstest zur Bestimmung der H^+ -Konzentration durch Titrimetrie ($H_f(\text{Titr})$) und Berechnung aus dem pH-Wert ($H_f(\text{pH})$)

Bodentiefe (cm)		Al	$H_f(\text{Titr})$	$H_f(\text{pH})$	$H+Al(\text{Titr})$	$H+Al(\text{pH})$
org.	UG x	8,8	9,4	10,8	18,2	19,6
	sx	0,2	0,5	0,8	0,7	1,0
Auflage	G x	2,7	1,8	2,2	4,5	4,9
	sx	0,4	0,2	0,4	0,3	0,6
0-10	UG x	5,8	2,0	1,6	7,8	7,4
	sx	0,4	0,5	0,2	0,6	0,6
	G x	4,3	1,2	1,2	1,5	5,5
	sx	0,8	1,0	0,2	1,2	1,0
10-20	UG x	4,9	0,3	0,2	5,2	5,1
	sx	0,1	0,06	0,05	0,09	0,07
	G x	4,0	0,7	0,3	4,7	4,3
	sx	0,2	0,3	0,04	0,2	0,1
20-30	UG x	3,9	0,3	0,01	3,93	3,9
	sx	0,4	0,1	0,04	0,30	0,22
	G x	3,9	0,6	0,04	4,5	3,9
	sx	0,4	0,5	0,02	0,7	0,2

x = Mittelwert
 sx = Standardabweichung
 G = gedüngt
 UG = ungedüngt

Aus der Tab. 7 geht hervor, daß das titrimetrische Verfahren größere Standardabweichungen aufweist als die Berechnung. Da im ersteren Fall die H^+ -Konzentration sich als Differenz zwischen den Werten der $H+Al$ -Bestimmung am Titrimeter und der Al -Bestimmung am AAS errechnet, gehen die Meßfehler beider Geräte (insbesondere jene für die Al -Bestimmung) in das Ergebnis ein. Häufig werden bei den Serienanalysen sogar negative Differenzen registriert, die wohl auf die gleichen Ursachen zurückzuführen sind.

In Tab. 7 ist im Oberbodenbereich (Auflage und 0-10 cm) relativ große Ähnlichkeit zwischen den beiden Bestimmungsarten festzustellen.

Mit zunehmender Bodentiefe (10-30 cm) werden die Unterschiede größer.

Als Übergangslösung entschloß ich mich für die Errechnung der H^+ -Konzentration aus dem pH-Wert. Die pH-Messung muß jedoch unmittelbar nach der Perkolation durchgeführt werden, da die Empfindlichkeit der Messung sehr hoch ist und außerdem die Lösungen rasch verderben.

4.1.2 Methodische Voruntersuchungen zur Extraktionsmethode

Diese Untersuchungen sollten klären, ob die Menge der Austauschlösung zur Bestimmung der extrahierbaren Kationen in NH_4Cl halbiert werden und ob die Bestimmung durch Schütteln der Extraktmischung sowie durch Zentrifugation verbessert werden kann. Ich erhoffte mir daraus große technische Vorteile im Bezug auf die Standardisierung der Extraktionsbedingungen und die Anwendbarkeit für Routine-Untersuchungen.

Folgende Aspekte wurden überprüft:

- a) Standardisierung der Absetzungszeit für den Lösungsextrakt durch maschinelles Schütteln
- b) Beheben von Filtrationsstörungen (trübe Lösung) durch Zentrifugation

Die Klärung dieser Problempunkte erlaubt die Anwendung der Methode, welche ursprünglich nur für Analysen des Mineralbodens entwickelt wurde, auch auf den Auflagehumus.

- c) Zusätzlich wurde die vom Arbeitskreis Waldbodenuntersuchung der VDLUFA (März 1985) erarbeitete Methode überprüft. Bei diesem Verfahren werden in 100 ml-PE-Flaschen 2 g lufttrockener Feinboden eingewogen. Dann werden 80 ml der 0,5 M NH_4Cl -Lösung zugegeben, die Flaschen verschlossen und kräftig von Hand aufgeschüttelt. Anschließend werden die Proben 2 Stunden maschinell geschüttelt. Die Proben bleiben über Nacht stehen, werden dann erneut kurz aufgeschüttelt und in den Faltenfilter überführt. Das Filtrat wird in 100 ml-PE-Flaschen aufgefangen. Die Bestimmung der Kationen erfolgt mittels Flammenfotometer und AAS.

Die untersuchten Alternativen und ihre Ergebnisse sind in den Tabellen 8 und 9 dargestellt. Das Probematerial stammte aus dem Versuch Großdick.

Tab. 8: Untersuchte Varianten der Extraktionsmethode in 0,5 M NH_4Cl

Bodenart	Alternativen	Kurzbeschreibung
Mineralboden	1 Trüby	2,5 g + 50 ml (T.v.E.) + 50 ml (n.T) 0,5 M NH_4Cl ; ohne Schütteln
	2 Eigene	2,5 g + 100 ml 0,5 M NH_4Cl (T.v.E.) ; n.T : 1 h Schütteln, 30 min zentrifugieren
	3 Eigene	2,5 g + 100 ml 0,5 M NH_4Cl (T.v.E.) ; n.T : 2 h Schütteln, 30 min zentrifugieren
	4 VDLUFA	2,0 g + 80 ml 0,5 M NH_4Cl (T.v.E.) ; n.T : 2 h Schütteln, ohne Zentrifugation
Auflagehumus	5 Eigene	1,25 g + 100 ml 0,5 M NH_4Cl (T.v.E.) ; n.T : 1 h Schütteln, 30 min zentrifugieren
	6 Eigene	1,25 g + 100 ml 0,5 M NH_4Cl (T.v.E.) ; n.T : 2 h Schütteln, 30 min zentrifugieren
	7 Eigene	1,25 g + 100 ml 0,5 M NH_4Cl (T.v.E.) ; über Nacht schütteln lassen; n.T : 30 min zentrifugieren

T.v.E. = Tag vor Extraktion
n.T. = nächsten Tag

Tab. 9: Bestimmung der in 0,5 M NH_4Cl extrahierbaren Kationen nach verschiedenen Alternativen (Durchschnittswerte und Standardabweichungen in mmol $\text{I}\ddot{\text{A}}/100\text{g}$)

Alternative	Anzahl Proben	Vol. Perkolat (ml)	pH	Al	Fe	Mn	Ni	K	Ca	Mg	BS (%)	KAK mmol $\text{I}\ddot{\text{A}}/100\text{g}$
1 Trüby	4 sx	92 0,5	3,6 0,05	2,51 0,15	0,97 0,03	0,15 0,01	0,29 0,08	0,20 0,06	4,54 0,09	0,23 0,03	59,0 2,0	8,90 0,10
2 Eigene	4 sx	91 0,0	3,6 0,0	2,36 0,04	0,88 0,02	0,15 0,00	0,23 0,02	0,13 0,00	4,37 0,06	0,24 0,01	59,4 0,2	8,36 0,10
3 Eigene	4 sx	93 1,0	3,7 0,0	2,48 0,05	0,96 0,04	0,15 0,00	0,28 0,01	0,17 0,02	4,45 0,11	0,22 0,01	58,7 1,2	8,74 0,10
4 VDLUFA	4 sx	70 1,0	3,6 0,0	2,27 0,13	0,88 0,08	0,13 0,02	0,23 0,02	0,14 0,01	4,12 0,30	0,21 0,00	59,0 0,4	8,00 0,56
5 Eigene	4 sx	93 0,5	4,0 0,0	1,37 0,05	0,16 0,00	1,80 0,02	0,62 0,11	1,13 0,02	23,20 0,40	2,00 0,05	89,1 1,0	30,56 0,22
6 Eigene	4 sx	92 1,0	4,0 0,0	1,37 0,10	0,15 0,02	1,80 0,03	0,62 0,05	1,05 0,09	23,70 0,30	2,00 0,06	89,2 0,5	30,63 0,41
7 Eigene	4 sx	86 1,5	4,0 0,0	1,34 0,08	0,16 0,01	1,80 0,01	0,61 0,09	1,15 0,08	22,40 1,00	1,90 0,15	89,0 1,5	29,94 0,58

x = Mittelwert
sx = Standardabweichung
KAK ex. = extrahierbare Kationen in 0,5 M NH_4Cl
BS = Basensättigung

Die Alternative 4 (VDLUFA) liefert relativ niedrige Werte und hohe Standardabweichungen verglichen mit den anderen Methoden. Dies ist darauf zurückzuführen, daß keine Vorzentrifugation durchgeführt wird, so daß die Filtration nicht optimal abläuft.

Da die Extraktion mit den Alternativen 2 und 3 für Mineralboden ähnliche Ergebnisse liefert wie die Trüby-Methode, wurden diese Varianten wegen der besseren Standardisierbarkeit der Arbeitsvorgänge (1 h) und wegen der Verbesserung der Filtrationsqualität (keine trübe Lösung wie bei 1 und 4) zunächst ausgewählt. Schließlich zog ich die Alternative 2 vor, da Alternative 3 trotz des zweistündigen Schüttelns keine Erhöhung der Meßergebnisse bewirkte.

Die Erweiterung der Methode für Auflagehumus wurde unter den gleichen Bedingungen wie für Mineralboden überprüft, wobei ich die Proben- einwaage halbierte. Für den Auflagehumus wählte ich die Alternative 5 aus, da sowohl zweistündiges Schütteln als auch das Schütteln über Nacht keine wesentlichen Veränderungen ergab.

4.1.3 Zusammenfassung der methodischen Voruntersuchungen

Die Hauptmerkmale der beiden KAK-Bestimmungsmethoden sind in Tab. 10 zusammengefaßt.

Tab. 10: Bewertung der Methoden zur Bestimmung der KAK

Methoden:	Perkolatlon (1 M NH ₄ Cl)	Schüttellextraktion (0,5 M NH ₄ Cl)
Austauschgrad	vollständiger Austausch; Materialablagerungen am Röhrchen	unvollständiger Austausch (Fe, Al)
Austauschdauer	unterschiedlich: Auflage 4-6 h Mineralboden 8-12 h	regelmäßig: Auflage 1 h Mineralboden 1 h
Qualität der Messungen	ständige Störungen der Messungen (Verstopfung u. Schwankungen an Flam- menphotometer und AAS)	Die Messungen liefen i.d.R. ohne starke Schwankungen ab, außer bei Al
Bestimmung von H ⁺ und Al ⁺⁺⁺	H ⁺ aus pH vor und nach der Perkolatlon; geringe Standardabweichungen im Vergleich zum üblichen Titrations- Verfahren	Al ⁺⁺⁺ und H ⁺ durch Titration mit NaOH. Die Endpunkt-Indi- kation erfolgt photometrisch mit einem MICROHM Titroprozes- sor (zu überprüfen)
Zuverlässigkeit der Werte	im allgemeinen höhere Standardabweichungen	im allgemeinen geringe Standardabweichungen
Leistung und Anwendbarkeit	zeitlich aufwendig für wissenschaftliche Untersuchungen	optimal für Routine-Untersuchungen

4.1.4 Durchführung der Serienanalysen nach beiden KAK-Methoden

Die Durchführung der eigentlichen Serienuntersuchungen erfolgte mit der ULRICH-Methode ohne substantielle Modifizierung, während wir die TRÜBY-Methode merklich verbesserten.

4.2 Methodische Voruntersuchungen zur Analyse der Gleichgewichtsbodenlösung (GBL) und des Wassereextrakts (WE)

Das Ziel dieser Voruntersuchungen war es, vor Durchführung der großen Serienuntersuchungen eventuell auftretende methodische Probleme herauszufinden, beide Methoden zu optimieren und hinsichtlich ihres Extraktionsvermögens zu vergleichen.

4.2.1 Methodische Voruntersuchungen zur Gewinnung der GBL

Folgende Fragestellungen wurden in dieser Untersuchung geprüft:

- a) Mögliche Verminderung des Bodenmaterials zur Analyse, da nur begrenzte Mengen an Substrat zur Verfügung standen
- b) Dauer der Extraktion und Gewinnungsart der Lösung: Zentrifugation oder Absaugen?
- c) Dauer der Gleichgewichtseinstellung
- d) Einfluß des Boden/Lösungs-Verhältnisses
- e) Filtertyp
- f) Messung der Kationen und Anionen bei gefärbten Lösungen in GBL und WE

Die untersuchten Alternativen und Ergebnisse sind in den Tabellen 11 und 12 dargestellt.

Tab. 11: Beschreibung der überprüften Varianten zur Analyse der GBL

Variante	Menge Boden (g)	Filterart (µm)	Zentrifugieren, U./min.	Zeit für GG-Einstellung	Verhältnis Wasser/Boden	Feuchtigkeit d. Probe	Gewinnung d. Lösung (ml)
1	800	0,45	3000 (A)	2h	0,8	25 %	170,9
2	400	0,45	3000 (A)	2h	0,8	25 %	86,5
3	200	0,45	3000 (Z)	2h	0,8	25 %	37,9
4	200	0,45	4000 (Z)	2h	0,8	25 %	41,9
5	200	0,20	3000 (Z)	2h	0,8	25 %	36,6
6	200	0,45	3000 (Z)	4h	0,8	25 %	32,3
7	200	Blauband-filter	- (A)	2h	0,8	25 %	40,7
8	200	0,45	3000 (Z)	2h	0,7	25 %	27,5

GG = Gleichgewicht
A = Absaugen
Z = Abzentrifugation

Tab. 12: Ergebnisse der Überprüfung der GBL-Methode
(Durchschnittswerte in mg/l)

Variante	pH	Al	K	Na	Ca	Mg	Fe	Mn	Cl	SO ₄	NO ₃	NH ₄	ΣAn. mmol/l X/l	ΣAn. mmol/l X/l
1	4,25	3,5	4,8	14,0	9,3	1,3	1,4	0,6	20,1	35,8	n.n.	n.b.	1,59	1,32
2	4,25	3,6	4,3	12,0	8,5	1,2	2,4	0,5	8,7	36,8	n.n.	n.b.	1,50	1,01
3	4,30	3,6	4,2	6,5	4,4	1,1	2,2	0,4	7,9	28,8	n.n.	n.b.	1,22	0,83
4	4,30	3,2	3,6	4,8	4,0	1,1	1,2	0,4	7,3	37,6	n.n.	n.b.	1,03	0,99
5	4,30	3,4	5,6	5,4	4,8	1,2	2,1	0,4	6,7	31,9	n.n.	n.b.	1,23	0,85
6	4,00	3,6	4,0	4,0	4,3	1,2	3,0	0,5	5,7	33,8	n.n.	n.b.	1,17	0,86
7	4,50	2,2	4,2	13,0	6,4	1,6	0,8	0,3	20,2	33,2	n.n.	n.b.	1,43	1,27
8	4,20	3,7	4,8	7,5	4,9	1,3	2,0	0,4	9,7	33,2	n.n.	n.b.	1,36	1,00

n.n. = nicht nachweisbar
n.b. = nicht bestimmt

Aus den Tabellen 11 und 12 läßt sich folgendes ableiten:

a) Die eingesetzte Menge Boden stellt einen wichtigen Faktor dar. Zur GEL-Analyse sind erhebliche Boden- und Lösungsmengen notwendig, da sowohl Kationen als auch Anionen zu messen sind. Statt der in der Originalvorschrift nach ULRICH angegebenen Mengen (700-800 g) überprüfte ich die Auswirkungen einer Reduktion auf 400 g und 200 g (Alternativen 3, 4, 7). Es ergab sich eine lineare Beziehung zwischen Bodeneinwaage und gewonnener Lösungsmenge. Danach reduzierte ich die Bodenmenge endgültig auf 200 g Trockengewicht. Man erhält so eine Lösungsmenge von ca. 40 ml, die für die Laboranalysen ausreichend ist. Bei Zentrifugation mit 4000 Umdrehungen pro Minute (Alternative 4) erhält man nur eine geringfügig größere Lösungsmenge als bei 3000 U/min.

b) Extraktionszeit und Gewinnungsart der Lösung (Abzentrifugieren oder Absaugen)

Die Extraktionszeit ist ein wichtiger Faktor bei der Durchführung von Routine-Untersuchungen mit großer Probenzahl. Für die Gewinnung der GEL wurde zum einen das Absaugverfahren nach ULRICH (Alternativen 1, 2, 7) getestet; es beanspruchte bei unseren tonig-schluffigen Substraten 2-3 Stunden. Bei den Alternativen 1, 2 und 7 waren zudem die höchsten Na- und Cl-Konzentrationen festzustellen. Das ist möglicherweise auf Verunreinigungen durch das ständig notwendige Wechseln der Filter zurückzuführen.

Die Lösungen, die durch Abzentrifugieren (Alt. 3, 4, 5) gewonnen wurden, erhält man bereits nach 1/2-1 Stunde, und es treten keine Verunreinigungen auf. Da sich deshalb das Absaugverfahren als nachteilig erwies, wurden die Lösungen durch Abzentrifugieren gewonnen.

c) Dauer der Gleichgewichtseinstellung

Die zur Gleichgewichtseinstellung der GEL notwendige Zeit wurde kurz überprüft (Alt. 6). Nach 48 Stunden wurde eine leichte Minderung des pH-Werts (0,2-0,3 Einheiten) und des Na-Gehalts, außerdem eine Erhöhung des Fe-, Mn- und NO_3 -Niveaus festgestellt.

d) Einfluß des Boden/Lösungs-Verhältnisses

Der Einfluß des Boden/Lösungs-Verhältnisses (0,7 und 0,8 mg/l) wurde ebenfalls getestet (Alt. 8). Bei einem Verhältnis von

0,7 mg/l erhielt man eine geringe Lösungsmenge; außerdem wurde eine schwache Minderung des pH-Werts und eine leichte Erhöhung des Al-Werts beobachtet. Deshalb wurde das Verhältnis 0,8 mg/l eingehalten.

e) Filtertyp

Als Filtertyp wurde der Membranfilter (0,45 μ m) ausgewählt, da beim Blaubandfilter die Filtrationsqualität geringer ist: in der Lösung treten Tonmineralpartikel auf, die vermutlich eine Änderung der Al-, Na- und K-Werte bei der Messung hervorrufen. Der Filter 0,45 μ m lieferte durchweg völlig klare Filtrate.

Nach Untersuchung aller Alternativen zur Gewinnung der GBL wurde die Alternative 3 für die eigentlichen Serienuntersuchungen der GBL eingesetzt (siehe Punkt 4.2.4).

f) Messung der Kationen und Anionen bei gefärbten Lösungen in GBL und WE

- Kationen

Die Messung der Kationen erfolgte an AAS und Flammenfotometer und lief reibungslos ab (außer für Al).

- Anionen

Anders verhält es sich bei der kolorimetrischen Messung der Anionen nach dem kontinuierlichen Verfahren (Autoanalyser). Für dieses Meßverfahren ist es erforderlich, daß die Lösungen farblos sind; denn bei durch Huminstoffe gefärbten Lösungen erhält man falsche Konzentrationsangaben, weil die Lichtabsorption durch die Anwesenheit gelöster Huminstoffe gestört wird. Diese Fehlermöglichkeit wurde wie folgt geprüft:

- Durch Verdünnen der gefärbten Proben 1:5, 1:10 und 1:20. Die verdünnten, d. h. nur noch leicht gefärbten Proben wurden erst mit den entsprechenden Reagenzien gemessen. Anschließend ließ man sie ohne Reagenzien (nur Aqua-dest. als Zusatz) ein zweites Mal durchlaufen. Die erste Messung entspricht dem Realwert + Meßfehler durch Farbe. Die zweite Messung entspricht der Basislinie oder dem Blindwert. Die Differenz zwischen beiden Meßwerten ergibt den "Realwert".

- Zur Entfärbung wurden Baker-Säulen geprüft. Dabei wurden die gefärbten Lösungen über eine Säule aus Octadecyl- C_{18} gefiltert, welche Huminstoffe sorbiert, und die Lösungen entfärbten. Damit konnten jedoch nur sehr geringe Lösungsmengen gewonnen werden, da die Sättigung der Harze schnell ablief. Darüber hinaus wäre dieses Verfahren bei hoher Probenzahl praktisch (wie auch finanziell) sehr aufwendig.
- Auf die Messung der Anionen am Ionenchromatograph wurde verzichtet, da die notwendigen Trennsäulen damals nicht vorhanden waren. Dies wäre jedoch sicherlich der beste Ansatz zur Lösung des Problems gewesen.

Die Ergebnisse der Verdünnungstests mit jeweils 4 Proben aus dem Versuch WAL 234 sind in den Tabellen 13 und 14 für GEL und WE dargestellt, und zwar für die Tiefenstufen 0-10 und 20-30 cm je Variante.

Tab. 13: Einfluß der gefärbten GEL-Lösungen auf die Meßergebnisse (mg/l)

Element	Tiefe (cm)	Versuchsglied					
		Kontrolle		Voildüngung		Lupine	
		RW	% VM	RW	% VM	RW	% VM
NH ₄ -N	0-10	2,4	n.n.	2,4	n.n.	5,2	n.n.
	20-30	1,3	-	1,1	n.n.	1,6	n.n.
NO ₃ -N	0-10	0,06	n.n.	0,2	-	0,3	-
	20-30	0,10	-	0,2	-	0,3	-
Cl	0-10	52,4	8,7	36,9	20,6	52,5	17,0
	20-30	15,6	-	11,1	-	12,4	-
SO ₄ -S	0-10	50,6	9,7	77,1	19,0	67,2	23,0
	20-30	12,4	-	13,3	-	17,0	-

RW = Realwert

% VM = prozentuale Verfälschung der Messung durch die Farbe

n.n. = nicht nachweisbar

Aus der Tabelle geht hervor, daß nur die Cl- und SO₄-Konzentrationen im oberen humosen Bodenbereich (0-10 cm) und vor allem auf den meliorierten Parzellen (mittelbraune Lösungsfarbe) durch die starke Eigenfärbung verfälscht werden. Auf den Kontrollparzellen (leicht bräunlich gefärbte Lösung) betrug der Fehler durch Eigenfärbung 9-10 %,

bei den meliorierten Substraten rund 20 %.

Für $\text{NO}_3\text{-N}$ konnten im Test keine Veränderungen durch die Verfärbung festgestellt werden, da die Werte unter der Nachweisgrenze liegen. Im Versuch Archeohe allerdings traten bei höherer $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentration auf den meliorierten Parzellen Abweichungen von 15-30 % auf. Die Messung von $\text{NH}_4\text{-N}$ wurde nicht beeinflusst.

Tab. 14: Einfluß der gefärbten WE-Lösungen auf die Meßergebnisse (mg/l)

Element	Tiefe (cm)	Versuchsglied					
		Kontrolle		Voildüngung		Lupine	
		RW	% VM	RW	% VM	RW	% VM
$\text{NH}_4\text{-N}$	0-10	4,2	7,3	2,8	10,5	4,2	7,4
	20-30	1,4	n.n.	1,4	n.n.	1,4	n.n.
$\text{NO}_3\text{-N}$	0-10	0,4	n.n.	0,4	n.n.	0,5	n.n.
	20-30	0,2	n.n.	0,2	n.n.	0,3	n.n.
Cl	0-10	21,5	28,9	18,1	29,9	18,0	32,6
	20-30	7,4	n.n.	8,6	n.n.	6,6	n.n.
$\text{SO}_4\text{-S}$	0-10	289,1	6,3	269,3	5,8	306,7	8,6
	20-30	19,1	2,2	16,1	2,1	21,8	2,9

RW = Realwert
 % VM = prozentuale Verfälschung der Messung durch die Farbe
 n.n. = nicht nachweisbar

Im 2:1-Wasserextrakt (Tab. 14) sind für $\text{NH}_4\text{-N}$, Cl und $\text{SO}_4\text{-S}$ Meßfehler wegen der Färbung festzustellen. Allerdings treten keine gravierenden Unterschiede zwischen den Behandlungen auf, da die Lösungen gleichmäßig gefärbt sind. Wesentlich beeinflusst sind die Werte von Cl (rund 20-30 %) im Oberboden bis 10 cm. Die $\text{SO}_4\text{-S}$ -Werte und ihre Verfälschungen nehmen mit zunehmender Tiefe ab. Die auf Verfärbung beruhenden Fehler der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Messung liegen bei 8-10 %. Die Werte für $\text{NO}_3\text{-N}$ sind an der Grenze der Nachweisbarkeit.

4.2.2 Methodische Voruntersuchungen zur Gewinnung des 2:1-Wasserextrakts (WE)

In den Voruntersuchungen wurde der Einfluß folgender Faktoren geprüft:

- Menge des Bodenmaterials
- Schüttelungszeit
- Zentrifugationszeit und -geschwindigkeit
- Filtertyp

Aus der folgenden Tabelle sind die untersuchten Alternativen zu ersehen. Die chemische Analytik ist unter 3.1.7.1 und 3.1.6.3 beschrieben.

Tab. 15: Untersuchte Varianten der WE-Methode

Variante	Menge Boden (g)	filterart (µm)	Zentrifugieren. U./min.	Schütteln (h)	Verhältnis Wasser/Boden	Zentrifug.- Zeit (h)	Gewinnung d. Lösung (ml)
1	35	0,45	3000	2h	1/2	30'	47,3
2	35	0,45	3000	20	1/2	30'	46,7
3	35	0,45	3000	2h	1/2	1 h	42,3
4	35	Wasser- filter	3000	2h	1/2	30'	47,6
5	35	0,20	4000	2h	1/2	30'	49,1

Tab. 16: Ergebnisse der Vergleichsanalysen nach der WE-Methode
(Durchschnittswerte in mg/l)

Variante	pH	Al	K	Na	Ca	Mg	Fe	Mn	Cl	SO ₄	NO ₃
1	3,9	27,4	2,9	2,2	4,0	1,5	31,6	2,5	8,2	440	0,51
2	3,8	30,0	2,1	2,4	4,3	1,6	32,9	2,3	7,4	479	0,56
3	3,8	29,7	2,1	2,2	3,8	1,5	31,9	2,3	7,9	473	0,63
4	3,8	28,3	2,7	4,4	4,1	1,6	31,7	2,2	10,2	501	0,68
5	3,7	28,8	2,8	2,6	2,6	1,4	32,3	2,2	9,0	460	0,54

Da alle untersuchten Varianten ähnliche Ergebnisse lieferten, wurde die Alt. 1 für die eigentlichen Serien-Untersuchungen eingesetzt (siehe 4.2.5)

4.2.3 Zusammenfassung der methodischen Voruntersuchungen zur Bestimmung der GBL und des WE

Die Hauptmerkmale der GBL- bzw. WE-Methode sind in Tab. 17 zusammen- gestellt.

Tab. 17: Bewertung der GBL- und WE-Methode

Methode :	GBL	WE
Probenmaterial	frischer Boden	getrockneter Boden Änderung der Zusammensetzung von Al und evtl. SO ₄
Aufwand für Probenahme	groß	gering
Abzentrifugation	1 h	1/2 h
Qualität der Filtration	unbefriedigend Filter muß oft gewechselt werden	optimal
Messung d. Katio- nen an AAS u. FFM	einwandfrei, außer Al an AAS / Ca am FFM (niedrigere Werte)	einwandfrei, außer Al
Messung d. Anionen	gefärbte Lösungen bei humusreichen Proben des Oberbodens: NO ₃ -N i.d.R. niedrigere, nicht beeinflusst; evtl. höhere, 15-30% NH ₄ -N nicht beeinflusst; Cl Verfälschung 10-20% SO ₄ -S Verfälschung 10-20%	identisch NO ₃ -N niedrigere, nicht beeinflusst; NH ₄ -N beeinflusst 10% Cl Verfälschung bis 30% SO ₄ -S Verfälschung 5-10%
Zuverlässigkeit der Werte	a priori höhere Standard- abweichungen u. VK %	a priori niedrige Standard- abweichungen u. VK %
Leistung und Anwendbarkeit	hoher Kosten- u. Zeit- aufwand für wissenschaftl. Untersuchungen	optimal für Routine- Untersuchungen

4.2.4 Durchführung der GBL-Serienanalysen

Nach Auswertung aller Überprüfungen zur Gewinnung und Analyse der GBL wurde die Variante 3 für die eigentlichen Serien-Untersuchungen eingesetzt (Zentrifugieren bei 3000 U/min.). Die Vorbehandlung der Proben ist erleichtert, da nur kleinere Bodenmengen benötigt werden. Die Extraktionszeit ist auf 1/2-1 Stunde verkürzt.

Die Filtration für humusreiche Proben müßte allerdings noch verbessert werden, da die Filter häufig verstopfen und oft gewechselt werden müssen. Ansonsten eignet sich die Methode gut für Routine-Untersuchungen.

4.2.5 Durchführung der WE-Serienanalysen

Da alle geprüften Alternativen ähnliche Werte lieferten, wurde die ULRICH-Methode übernommen. Allerdings arbeitete ich mit Membranfiltern (Alternative 1).

Die Methode eignet sich hervorragend für Routine-Untersuchungen, da die Vorbereitung der Proben und die Durchführung im Labor nur geringen Zeitbedarf erfordern.

5. Bodenchemische Auswertung des Versuchs WAL 234

5.1 Kennwerte der Bodenfestphase

Tab. 18 zeigt den pH-Wert, die C_{org} -, N_t -, P_t -Gehalte und die C/N- und C/P-Verhältnisse der Versuchsglieder (vergl. A-O).

5.1.1 pH-Werte

Die Bodenreaktion wurde durch beide Meliorationsverfahren in annähernd gleicher Weise verbessert, und zwar signifikant in der organischen Auflage und im Mineralboden bis maximal 20 cm. Die Wirkung der Meliorationseingriffe verringert sich mit der Bodentiefe.

5.1.2 Organischer Kohlenstoff

Bei beiden Meliorationsverfahren gingen die C_{org} -Gehalte in der organischen Auflage signifikant zurück. Im Mineralboden traten lediglich bei der Lupinen-Variante signifikante Abweichungen der Kohlenstoffgehalte bis 20 cm Tiefe auf. Dem Rückgang in der Auflage steht hier ein Anstieg im Mineralboden gegenüber. Für diese Zunahme im Mineralboden des Lupinen-Unterbaus sind eine etwas verstärkte Bio-turbation sowie die Neubildung von Wurzelmasse verantwortlich. Außerdem spielt sicher das Einnischen von Auflagehumus und Bodenvegetation durch das Einfräsen zu Versuchsbeginn eine entscheidende Rolle.

5.1.3 Gesamt-Stickstoff und C_{org}/N_t -Verhältnisse

Die Stickstoff-Gehalte zeigen in der Auflage nur nach Volldüngung eine signifikante, meliorationsbedingte Erhöhung. Im Mineralboden ist Stickstoff nach Lupinen-Unterbau in den ersten 10 cm signifikant angereichert. Unterhalb von 10 cm waren keine gesicherten Verschiebungen nachweisbar.

Aus der Veränderung der Kohlenstoff- bzw. Stickstoff-Gehalte auf den meliorierten Flächen ergibt sich eine Verschiebung der C/N-Verhältnisse. Ihre Einengung beschränkt sich auf die organische Auflage.

Nach Volldüngung und Lupinen-Unterbau entwickelte sich eine Moder-Humusform bzw. ein mullartiger Moder.

Die im Mineralboden überwiegend engen C/N-Verhältnisse sind wahrscheinlich auf einen hohen Anteil von in Zwischenschichten fixiertem $\text{NH}_4\text{-N}$ am Gesamtstickstoff zurückzuführen.

Beobachtungen am Standort zeigten, daß beide meliorierten Flächen einen höheren Zersetzungsgrad des organischen Materials aufwiesen.

5.1.4 Gesamt-Phosphor und $\text{C}_{\text{org}}/\text{P}_{\text{t}}$ -Verhältnisse

Beide Meliorationsverfahren führten in der Auflage zu einer deutlichen Erhöhung des Phosphor-Gehaltes. Im Mineralboden war nur in der Tiefe 10-20 cm der Lupinenvariante ein sichtbarer Anstieg zu erkennen, der vermutlich auf einer Anreicherung von Düngerphosphat durch das Einfräsen beruht.

In der Auflage sind deutliche Veränderungen der C/P-Verhältnisse zu beobachten. Die C/P-Werte liegen auf der Kontrollfläche viel höher als auf den meliorierten Parzellen; dies belegt ebenfalls, daß durch die Melioration günstige Humusformen entstanden sind, nämlich typischer Moder bis mullartiger Moder (vergl. 5.1.3).

Die Ausweitung der C/P-Verhältnisse im Mineralboden unter Lupine dürfte Folge des EinfräSENS von Auflagematerial mit hohem C/P-Verhältnis sein.

5.1.5 Gesamtvorräte an Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor

Die Gesamtvorräte (organische Auflage und Mineralboden) der Versuchsglieder an C, N, P und Ca sind in Tab. 19 dargestellt.

Auf beiden meliorierten Versuchsvarianten ist der C_{org} -Vorrat eindeutig reduziert. Die Kohlenstoffverluste lagen nach Volldüngung und Lupine bei 8 bzw. 18 % des Kapitals, gingen jedoch einher mit verbesserter biologischer Tätigkeit und günstigeren Humusformen.

Die Stickstoffvorräte blieben nach Volldüngung unverändert und verringerten sich auf den Lupinenparzellen um rund 5 %. Im Mineralboden erhöhte sich das N-Kapital regelmäßig, so daß die Stickstoffverluste

hauptsächlich in der Auflage als Folge der beschleunigten Mineralisation auftraten.

Die Gesamtvorräte an Phosphor wurden durch die Meliorationseingriffe nicht signifikant verändert.

5.1.6 Gesamtgehalte und -vorräte an Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium (mg/g)

Aus der Tab. 20 sind die Ca-, Mg-, K- und Na-Gehalte zu ersehen.

In der Auflage und bis zu 20 cm Tiefe des Mineralbodens läßt sich wie bei den pH-Werten ein deutlicher Anstieg der Ca-Gehalte feststellen. Diese Zunahme wurde vor allem durch die Kalkgabe bei Versuchsbeginn verursacht.

Die Gesamtvorräte an Ca stiegen ebenfalls auf den meliorierten Flächen gegenüber der Vergleichsfläche an. Nach der Anfangsdüngung vor 22 Jahren liegen die Ca-Vorräte für die Volldüngung noch um rund 80 % und für die Lupinenvariante um rund 52 % höher als auf der Kontrolle (vgl. Tab. 19).

Die Mg-Gehalte sind nach Melioration lediglich in der Auflage signifikant erhöht. Die Vorräte liegen bei allen Varianten in ähnlicher Größenordnung. Der Düngungs-Input ist auf den Volldüngungsparzellen praktisch ohne Verlust erhalten geblieben. Die Lupinenfelder schneiden in allen Bodentiefen etwas ungünstiger ab, was vermutlich auf Lockerung und Einfräsen von Mg-armem Auflagehumus beruht.

Die K-Gehalte wurden im Vergleich zur Kontrolle nur durch den Lupinen-Unterbau signifikant verändert: Durch das Vermischen von organischer Auflage und Mineralboden als Folge des Fräsens stiegen die K-Gehalte im O-Horizont an, jene im Mineralboden gingen zurück. Die Lupinenvariante schneidet auch in den Kaliumvorräten des Oberbodens am schlechtesten ab. Die schwache K-Düngung zu Beginn des Versuchs hat auf keiner der beiden Meliorationsvarianten die K-Vorräte gesteigert.

Die Na-Gehalte und -vorräte wurden durch die Meliorationseingriffe nicht beeinflußt (vergl. Anhang A-1).

Tab. 18: pH-Werte, C_{org} -, N_t -, P_t -Gehalte (mg/g) und die C/N- und C/P-Verhältnisse der Versuchsglieder des Versuchs WAL 234
(Die Buchstaben kennzeichnen die Signifikanzen zwischen den Versuchsgliedern)

Tiefe (cm)		KON	VOLL	LUP
pH- H ₂ O	Auflage	3.5a	4.3b	4.2b
	00-10	3.4a	3.8b	3.8b
	10-20	3.9a	4.1b	4.0b
	20-30	4.1a	4.2a	4.2a
pH- CaCl ₂	Auflage	2.8a	3.8b	3.7b
	00-10	3.1a	3.3b	3.4b
	10-20	3.6a	3.7a	3.7a
	20-30	4.0a	4.0a	4.0a
C-org.	Auflage	463.1a	430.3b	375.3c
	00-10	27.7a	29.4a	40.7b
	10-20	10.9a	11.6a	13.8b
	20-30	7.0a	6.8a	7.7a
N _t	Auflage	13.1a	14.1b	13.5ab
	00-10	1.2a	1.3a	1.7b
	10-20	0.7a	0.8a	0.8a
	20-30	0.6a	0.6a	0.6a
C/N	Auflage	35.4a	30.5b	27.8c
	00-10	23.8a	22.8a	24.5a
	10-20	15.1a	14.9a	17.5a
	20-30	12.2a	11.9a	12.9a
P _t	Auflage	0.7a	0.9b	0.9b
	00-10	0.6a	0.6a	0.6a
	10-20	0.6a	0.6a	0.7b
	20-30	0.5a	0.5a	0.6a
C/P	Auflage	698.5a	486.6b	412.7c
	00-10	51.2a	51.2a	67.3b
	10-20	17.9a	20.2a	20.6a
	20-30	12.9a	12.5a	13.8a

Tab. 19: Bioelementvorräte im Oberboden (org. Auflage und Mineralboden 0-30 cm) der Versuchsglieder im Experiment WAL 234

(Die Buchstaben kennzeichnen die Signifikanzen zwischen den Versuchsgliedern)

		KON	VOLL	LUP
C	t/ha	89.2a	81.7b	72.2c
N	kg/ha	3668a	3685a	3386b
P	kg/ha	1731a	1687a	1784a
Ca	kg/ha	2105a	3574b	2903c

Tab. 20: Ca-, Mg-, K- und Na-Gehalte (mg/g) der Versuchsglieder im Experiment WAL 234

(Die Buchstaben kennzeichnen die Signifikanzen zwischen den Versuchsgliedern)

Tiefe (cm)		KON	VOLL	LUP
Ca	Auflage	2.4a	14.3b	10.3b
	00-10	0.9a	1.1ab	1.5b
	10-20	0.5a	0.7b	0.7a
	20-30	0.5a	0.6a	0.5a
Mg	Auflage	0.5a	0.8b	0.8b
	00-10	1.1a	1.1a	1.0a
	10-20	1.2a	1.3a	1.1a
	20-30	1.5a	1.6a	1.3a
K	Auflage	2.2a	2.7a	3.7b
	00-10	19.9a	20.5a	17.2b
	10-20	21.9a	21.7a	19.5b
	20-30	22.6a	23.1a	20.6b
Na	Auflage	0.5 a	0.6a	0.7a
	00-10	2.8 a	3.3a	2.8a
	10-20	3.0 a	2.8ab	2.2b
	20-30	2.7 a	2.9a	2.3a

5.1.7 Gesamtgehalte und -vorräte an Mangan, Eisen und Aluminium

Die Elementgehalte waren in der Auflage signifikant durch die Melioration erhöht. Der Anstieg dürfte hauptsächlich auf verstärkter Bioturbation beruhen. Speziell für Mn ist wahrscheinlich auch mit einer Verminderung seiner Mobilität als Folge der pH-Erhöhung zu rechnen (vergl. Anhang A-1).

5.2 Kationenaustauscheigenschaften

5.2.1 Vergleich zwischen Perkolaten (1 M NH_4Cl) und Schüttel-extrakten (0,5 M NH_4Cl) zur Bestimmung von austauschbaren Kationen

Beide Verfahren liefern weitgehend übereinstimmende Ergebnisse für Ca und Mn. Die Schüttelextraktionsmethode führt dagegen im Trend zu höheren Gehalten an K und Na insbesondere in der Auflage.

Die nach beiden Verfahren bestimmten Mg-Konzentrationen unterscheiden sich signifikant in der Weise, daß die Perkulationsmethode für die Auflage, das Schüttelverfahren für den Mineralboden höhere Werte ergibt.

In den Perkolaten fand ich in der Tendenz höhere Fe- und Al-Konzentrationen als im Schüttelextrakt; dies gilt vor allem für Fe und die organische Auflage. Bei den Al-Werten treten hohe Standardabweichungen auf, so daß die Unterschiede meist nicht signifikant sind.

Die H-Gehalte im Mineralboden werden nach dem Schüttelverfahren bedeutend höher eingeschätzt als nach der Perkulationsmethode.

Für die Basensättigung und Kationenaustauschkapazität ergab sich in der Regel eine gute Übereinstimmung beider Verfahren (vergl. Anhang A-2).

5.2.2 Überprüfung der Meliorationswirkungen auf Kationen-austauschkapazität und Basensättigung

Die wichtigsten Ergebnisse der KAK-Bestimmung nach beiden Methoden für diesen Versuch sind in den Tabellen 21 und 22 eingetragen.

Die KAK nimmt mit zunehmender Bodentiefe allmählich ab. Beide Methoden wiesen für die Volldüngungsvariante in der organischen Auflage besonders hohe Werte nach. Im Mineralboden unterscheiden sich die meliorierten Versuchsflächen nicht von der Kontrolle. Es fällt lediglich auf, daß Versuchsglied Lupine in 0-10 cm Tiefe tendenziell höhere KAK-Werte aufweist.

Die Melioration führte jedoch auf den behandelten Flächen zu einer deutlichen Erhöhung der Basensättigung bis zu einer Bodentiefe von 30 cm. Signifikante Meliorationseffekte sind in der Auflage und im Mineralboden bis 10 cm zu registrieren, wobei im O-Horizont nach Volldüngung etwas höhere Sättigungswerte nachzuweisen sind als auf der Lupinenvariante. Im Mineralboden ist umgekehrt der Lupinenunterbau überlegen. Besonders groß ist die Differenz in der Tiefe 0-10 cm. Im unteren Mineralbodenbereich (10-30 cm) ist mit dem Schüttelverfahren die Überlegenheit der Lupinenvariante zu sichern, während nach der Perkulationsmethode wegen der hohen Streuung keine gesicherten Unterschiede mehr bestehen (vergl. Anhang A-3,4).

5.2.3 Überprüfung der Meliorationswirkungen auf die Ionen-sättigungen mit beiden Methoden der KAK-Bestimmung

Die prozentualen Anteile der einzelnen Kationen an der KAK sind aus der Abb. 5 und den Tab. 21 und 22 zu ersehen (s. Anhang A-3,4,5).

Hauptkomponenten der KAK sind H+Al und Ca. Sie machen sowohl nach Perkolation als auch nach Schüttelextraktion zusammen zwischen 79-94 % bzw. 86-92 % der KAK aus. Der prozentuale Anteil von Al und Fe liegt nach dem Perkulationsverfahren insgesamt höher als nach dem Schüttelverfahren, vor allem im Mineralboden. H verhält sich dagegen umgekehrt. Beide Methoden lassen meliorationsbedingte Abnahmen der austauschbaren Gehalte an Fe, Al und H vor allem in der organischen Auflage erkennen. Auf der Kontrollvariante überwiegt Al an den Aus-

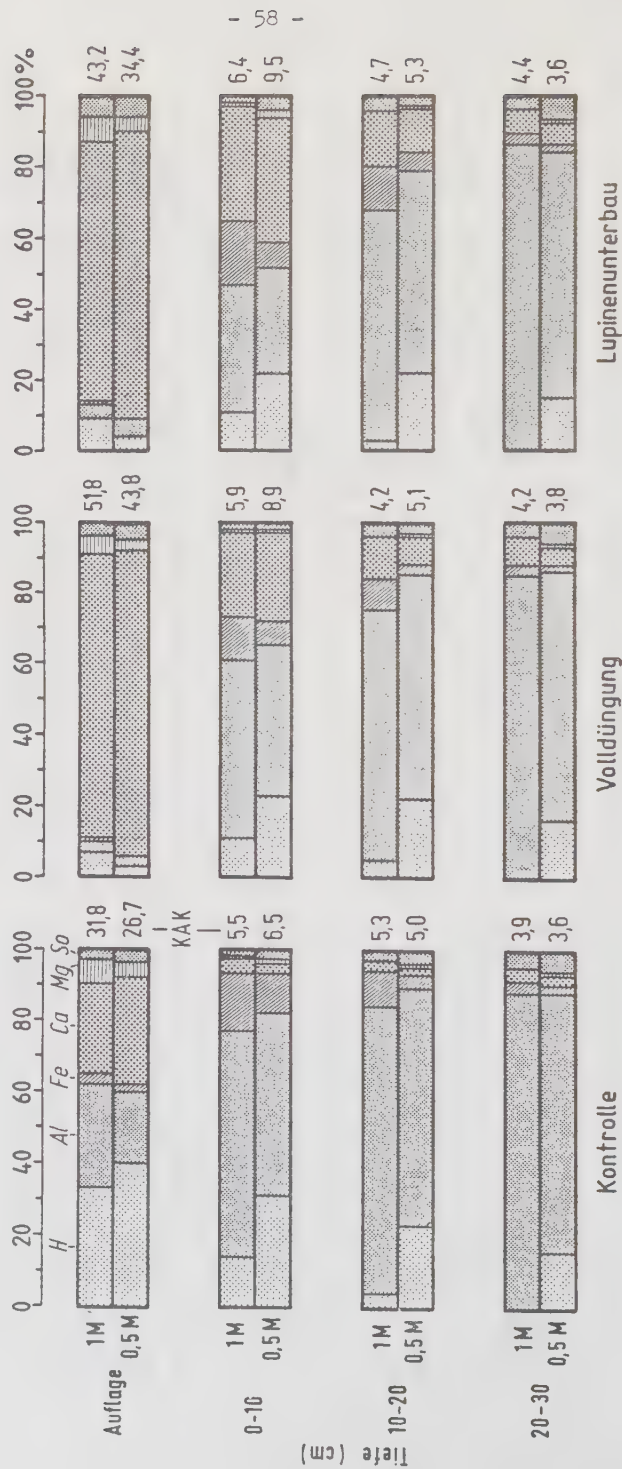
Tab. 21: Prozentuale Anteile von H^+ , Al^{3+} und Ca^{2+} an der KAK und Basensättigung für die Versuchsglieder nach der Perkulationsmethode (1 M NH_4Cl).
(Die Buchstaben kennzeichnen die Signifikanzen zwischen den Versuchsgliedern)

Tiefe (cm)	H(%)			Al(%)			Ca (%)			Basensättigung(%)			KAK(mmol/1A/100g.)		
	KON	VOLL	LUP	KON	VOLL	LUP	KON	VOLL	LUP	KON	VOLL	LUP	KON	VOLL	LUP
Auflage	32.7a	6.5b	9.7b	28.8a	3.1b	4.4b	24.7a	80.9b	74.1b	33.6a	87.4b	82.9b	31.8a	51.8b	43.2c
00-10	14.0a	11.1a	11.0a	62.6a	49.9a	35.7a	3.9a	24.6b	32.1b	6.7a	26.8b	34.9a	5.5a	5.9a	6.4a
10-20	4.0a	5.3a	3.4a	80.6a	70.9b	65.2b	3.6a	11.7b	15.9b	5.0a	14.2a	18.4a	5.3a	4.2a	4.7a
20-30	0.3a	0.3a	0.6a	88.4a	85.6a	86.3a	3.3a	7.8b	7.2b	6.0a	10.3a	9.1a	3.9a	4.2a	4.4a

Tab. 22: Prozentuale Anteile von H^+ , Al^{3+} und Ca^{2+} an der KAK und Basensättigung für die Versuchsglieder nach der Schütteleextraktmethode (0,5 M NH_4Cl).
(Die Buchstaben kennzeichnen die Signifikanzen zwischen den Versuchsgliedern)

Tiefe (cm)	H(%)			Al(%)			Ca (%)			Basensättigung(%)			KAK(mmol/1A/100g.)		
	KON	VOLL	LUP	KON	VOLL	LUP	KON	VOLL	LUP	KON	VOLL	LUP	KON	VOLL	LUP
Auflage	39.5a	2.6b	3.9b	19.6a	3.1b	4.8b	29.4a	86.4b	80.9b	31.1a	91.6b	88.2b	26.7a	43.8b	34.4c
00-10	31.4a	23.5a	22.4a	50.9a	41.6a	29.9b	3.2a	24.5b	35.6c	6.0a	27.8b	38.9c	8.5a	8.9a	9.5a
10-20	23.0a	22.1a	21.9a	65.9a	63.0a	56.8a	2.3a	7.5b	12.5b	6.3a	11.4a	16.3b	5.6a	3.8a	3.6a
20-30	16.1a	16.6a	15.2a	72.8a	69.8a	68.6a	2.8a	5.3b	6.3b	8.0a	11.0a	13.2b	3.6a	3.8a	3.6a

Abb. 5: Prozentuale Anteile der einzelnen Kationen an der KAK (mmol IÄ/100 g) nach Perkolation (1 M NH_4Cl) und Schüttelextraktion (0,5 M NH_4Cl). Versuch WAL 234



tauschern, was in stark sauren Böden zu erwarten ist. Nach Melioration ist der Ca-Anteil signifikant erhöht. Die Al-Sättigung steigt auf den meliorierten Flächen mit zunehmender Bodentiefe an, während die Ca-Sättigung abnimmt.

Die Melioration hat demnach bewirkt, daß der Ca-Anteil an der KAK in der Auflage und bis 30 cm Tiefe signifikant gegenüber den Kontrollflächen gestiegen ist. Während sich in der Auflage die Ca-Sättigung dem Trend nach auf den Volldüngungsflächen etwas stärker als auf der Lupinenvariante erhöhte, ist diese in den obersten 20 cm des Mineralbodens überlegen. Im unteren Mineralbodenbereich nähern sich die Werte an. Beide KAK-Methoden lieferten ähnliche Ca-Sättigungen und spiegeln die Meliorationswirkung in ähnlicher Weise wider.

Die Mg-Sättigung ist vor allem in der Auflage der Lupinenvariante ebenfalls signifikant angestiegen und erreicht rund 4-7 %.

Mn, K und Na nehmen nur einen sehr geringen Anteil der Austauschplätze ein und zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Versuchsgliedern.

5.2.4 Molverhältnisse von Ca/Al, Ca/H, Mg/Al und Basen/Säure-Verhältnisse (B/S) am Austauscher

Nach der Schüttelmethode lassen sich auf den meliorierten Flächen bei den Molverhältnissen von Ca/Al und Ca/H sowie beim B/S-Quotient bis 30 cm Tiefe eindeutige Zunahmen erkennen. Die Perkolationsmethode weist einen Meliorationseffekt dagegen nur bis maximal 20 cm Bodentiefe nach. Das Molverhältnis von Mg/Al ist auf den Meliorationsvarianten nach der Schüttelmethode in der Auflage und im Mineralboden 0-10 cm deutlich erhöht, während nach Perkolations in der Bodentiefe 0-20 cm signifikante Unterschiede nachzuweisen sind (s. Anh. A-3,4).

5.2.5 Vorräte an austauschbaren Kationen in organischer Auflage und Mineralboden (0-30 cm) nach beiden KAK-Methoden

In Tab. 23 sind die Vorräte an austauschbaren Kationen nach beiden KAK-Bestimmungsmethoden aufgeführt (vergl. Anhang A-3,4).

Die Kationen-Vorräte zeigen in der Tendenz ein ähnliches Bild wie die Gehalte an austauschbaren Kationen (siehe 5.2.1).

Die Säure-Kationen Fe und Al sind nach der Perkulationsmethode im Auflagehumus und Mineralboden stärker vertreten als nach dem Schüttel-extraktverfahren. Auch Mn ist hier leicht erhöht. Das Schüttel-extraktverfahren weist dagegen viel größere H-Vorräte sowie etwas höhere K- und Na-Mengen nach.

Für Ca und Mg stimmen die Ergebnisse beider Methoden der Größenordnung nach gut überein.

Meliorationsbedingte signifikante Zunahmen der austauschbaren Vorräte sind für Ca bis 30 cm Tiefe und für Mg bei der Volldüngungs-variante in der Auflage zu verzeichnen.

Die Vorräte an Säure-Kationen (H+Fe+Al) gingen nach Melioration in der organischen Auflage deutlich, im Mineralboden dagegen nur minimal zurück.

Für Na, K und Mn ließen sich keine deutlichen Verschiebungen nachweisen.

Tab. 23: Vorräte an austauschbaren Kationen in organischer Auflage und Mineralboden (0-30 cm) der Versuchsglieder nach beiden KAK-Methoden (in kmol IÄ/ha). Experiment WAL 234

		Perkulationsmethode			Schüttel-extraktmethode		
		KON	VOLL	LUP	KON	VOLL	LUP
H	org. Aufl.	10.6	3.0	2.1	10.7	1.0	0.7
	0-30 cm	8.0	10.5	7.0	40.7	34.8	32.0
	Gesamt	18.6	13.5	9.1	51.4	35.8	32.7
Al	org. Aufl.	9.3	1.4	1.0	5.3	1.3	0.9
	0-30 cm	109.5	90.9	87.6	97.9	89.4	76.8
	Gesamt	118.8	92.3	88.6	103.2	90.7	77.7
Fe	org. Aufl.	1.1	0.3	0.2	0.6	0.1	0.1
	0-30 cm	14.2	10.3	15.2	11.8	7.2	8.3
	Gesamt	15.3	10.6	15.4	12.4	7.3	8.4
Ca	org. Aufl.	8.0	38.5	17.9	8.0	34.8	15.5
	0-30 cm	6.9	20.2	25.8	4.5	24.2	33.9
	Gesamt	14.9	58.7	43.7	12.5	59.0	49.4
Mg	org. Aufl.	2.2	2.6	1.7	1.1	1.2	0.8
	0-30 cm	0.5	0.8	0.9	1.8	2.2	3.5
	Gesamt	2.7	3.4	2.6	2.9	3.4	4.3
Mn	org. Aufl.	0.5	1.1	0.6	0.4	0.9	0.5
	0-30 cm	1.3	0.8	1.1	0.7	0.8	0.8
	Gesamt	1.8	1.9	1.7	1.1	1.7	1.3
K	org. Aufl.	0.5	0.4	0.3	0.7	0.7	0.4
	0-30 cm	0.9	0.9	0.9	1.5	1.4	1.7
	Gesamt	1.4	1.3	1.2	2.2	2.1	2.1
Na	org. Aufl.	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1
	0-30 cm	0.9	1.5	1.5	2.8	3.0	3.3
	Gesamt	1.5	1.6	1.6	3.0	3.1	3.4

5.3 Kennwerte der Bodenlösung

5.3.1 Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der pH-Werte in GBL und WE

In Abb. 6 sind die saisonalen Abläufe und die Vertikalgradienten der pH-Werte in der GBL und im WE dargestellt.

Beide Methoden lassen eine Abnahme der Bodenazidität mit der Tiefe für alle Versuchsglieder erkennen. Die pH-Werte der GBL (3,7-4,9) variieren insgesamt in einem höheren Bereich als jene des WE (3,3-4,5). Solche Unterschiede können teilweise auf stärkere Freisetzung von Säure-Kationen durch das Schütteln des Bodens zurückgeführt werden. Auch die unterschiedlichen Wassermengen (Verdünnungseffekt), mit denen die Kationen extrahiert werden, kommen als Ursache für die beobachteten Abweichungen in Betracht.

Im zeitlichen Ablauf der pH-Werte in der GBL traten in der Regel keine statistisch signifikanten jahreszeitlichen Schwankungen auf. Nur in der GBL der beiden Meliorationsvarianten gingen die pH-Werte in der Tiefenstufe 0-10 cm im Juli geringfügig zurück, um im Oktober wieder anzusteigen. Im WE dagegen stiegen die pH-Werte auf allen Varianten im Oberboden signifikant an.

Sowohl in der GBL als auch im WE liegen die pH-Werte zu allen Terminen und in jeder Tiefenstufe auf den meliorierten Parzellen über denen der Vergleichsflächen. Bedeutende Unterschiede traten allerdings in der GBL nur in den obersten 20 cm auf. Die pH-Werte des WE spiegeln einen Meliorationseffekt nur für 0-10 cm Tiefe wider.

5.3.2 Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der Aluminium-, Eisen- und Mangan-Konzentrationen in GBL und WE

Die Abbildungen 7 und 8 informieren über die zeitlichen Abläufe und die Vertikalgradienten der Al- und Fe-Konzentrationen in GBL und WE.

Die Al- und Fe-Konzentrationen nehmen sowohl in der GBL als auch im WE mit zunehmender Bodentiefe ab.

Die Al- und Fe-Konzentrationen in der GBL weisen im Oberboden starke

saisonale Schwankungen auf. Sie steigen in 0-10 cm Tiefe von April bis Juli signifikant an, um gegen Herbst wieder zurückzugehen (Ausnahme Kontrolle). Trotz hoher pH-Werte im Oberboden der meliorierten Flächen treten in der GBL von April und Juli bedeutend höhere Al- und Fe-Konzentrationen auf als in vergleichbaren Horizonten der Kontrollvariante. Vermutlich liegen beide Elemente in diesem pH-Bereich in komplexierter Bindung vor.

Die Konzentrationen von Al und Fe im WE aus 0-10 cm Tiefe gehen dagegen von April bis Oktober signifikant und in kontinuierlicher Weise zurück. Im WE treten im Gegensatz zur GBL erwartungsgemäß auf den meliorierten Flächen signifikant niedrigere Fe-Konzentrationen auf als auf den Kontrollparzellen, während die Al-Konzentrationen durch die Behandlung nicht beeinflusst sind.

Mn in GBL und WE läßt keine saisonalen Veränderungen und keine Unterschiede zwischen den Versuchsvarianten erkennen.

5.3.3 Zeitliche und vertikale Variation der Calcium-, Magnesium-, Natrium- und Kalium-Konzentrationen in GBL und WE

Die Abbildungen 7 und 8 informieren über die Ca-Konzentrationen in der GBL und im WE.

Der zeitliche Verlauf für Ca in der GBL zeigt eine leichte Abnahme im Juli für die Varianten Kontrolle und Volldüngung in 0-10 cm Tiefe. Ferner ist auf der Lupinenvariante eine erhebliche Zunahme der Ca-Konzentration im Oktober erkennbar; im WE liegt das Ca-Niveau im Juli auf dem Versuchsglied unter den Werten für April. Im Unterboden (vor allem 10-20 cm) fällt für die Lupinenparzellen im Oktober ein signifikanter Anstieg der Ca-Konzentrationen auf.

Auf den meliorierten Flächen treten in GBL und WE höhere Ca-Konzentrationen auf. Der Anstieg ist nach beiden Methoden selbst noch in den untersten Tiefenstufen des Mineralbodens (30 cm) zu allen Jahreszeiten signifikant, so daß beide Methoden den Meliorationseffekt bezüglich dieses Elements besonders gut widerspiegeln.

Für Mg in der GBL ist als Trend im Oberboden und für die Termine Juli und Oktober ein Anstieg zu verzeichnen. Die Konzentrationen

Abb. 6: Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der pH-Werte in der Gleichgewichtsbodenlösung (GBL) und im 2:1-Wasserextrakt (WE); Versuch WAL 234

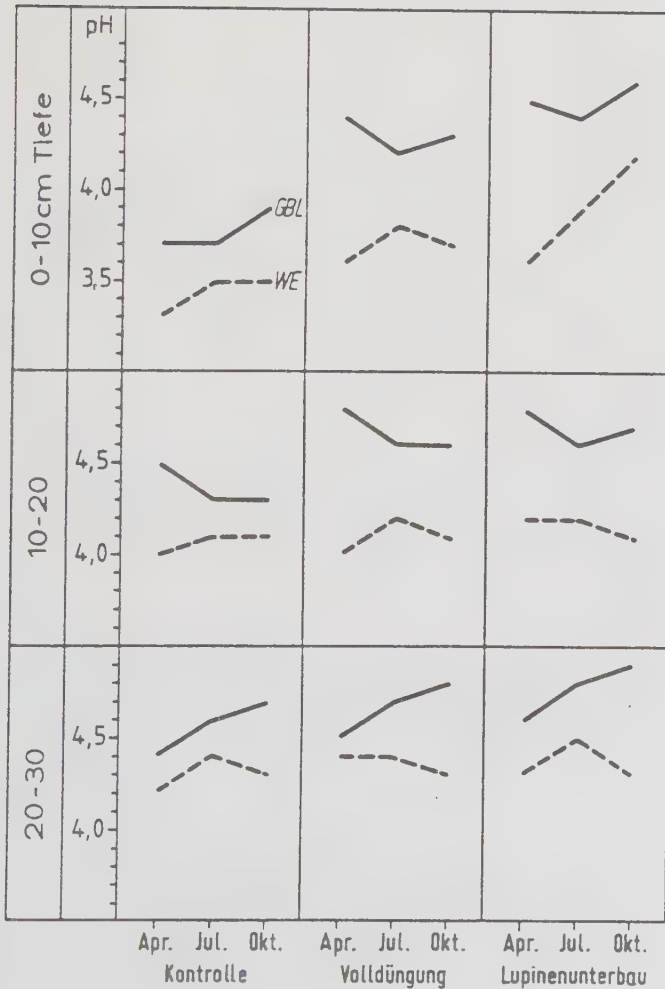


Abb. 7: Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der Aluminium-, Eisen- und Calcium-Konzentrationen (mg/l) in der GBL; Versuch WAL 234

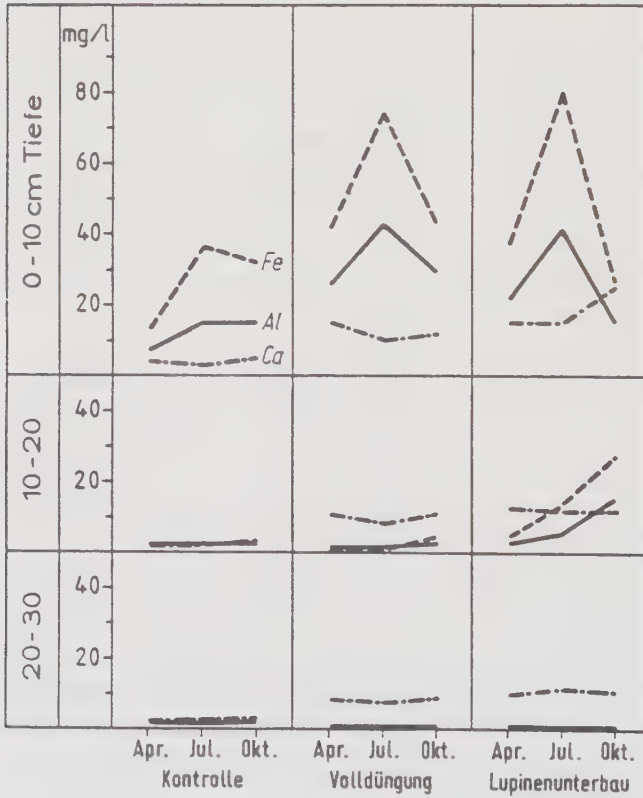
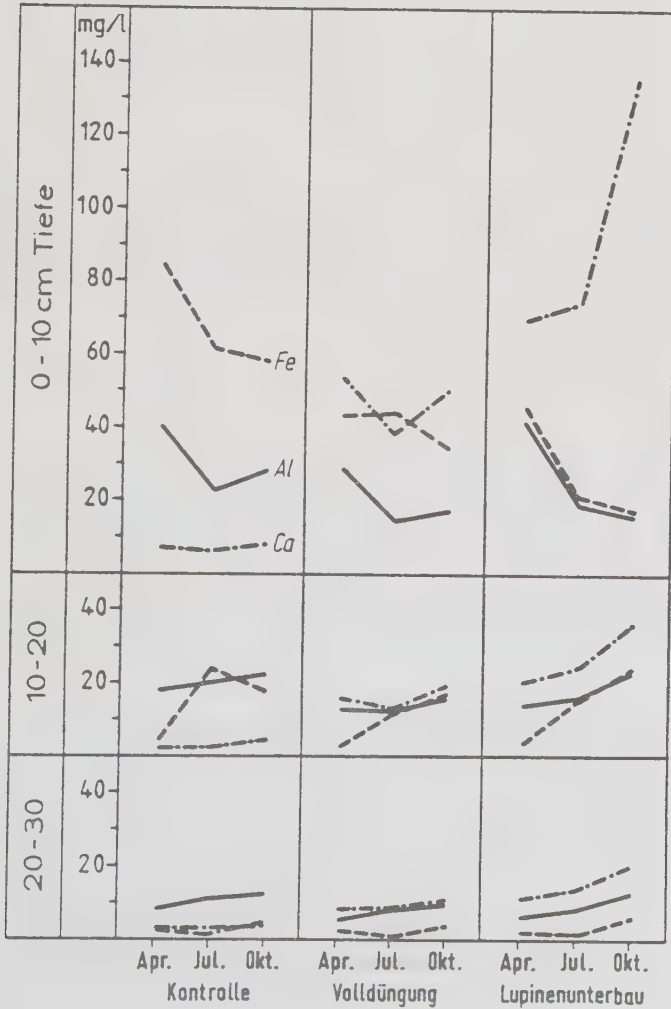


Abb. 8: Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der Aluminium-, Eisen- und Calcium-Konzentrationen (mg/l) im WE; Versuch WAL 234



weisen nur im WE des Oberbodens signifikante meliorationsbedingte Erhöhungen zu allen Jahreszeiten auf; dies gilt hauptsächlich für die Lupinenvariante.

Die Na- und K-Konzentrationen in GBL und WE zeigen keine deutliche jahreszeitliche Variation und waren durch die Behandlung nicht beeinflusst (vergl. Anhang A-6,8,11,12).

5.3.4 Zeitliche und vertikale Variation der NH_4^+ -N- und NO_3^- -N-Konzentrationen in GBL und WE

Die NH_4 -N-Konzentration nimmt in GBL und WE mit der Profiltiefe ab und bleibt im Unterboden nahezu konstant. NO_3 -N ist kaum vorhanden, die Konzentrationen variieren an der Nachweisbarkeitsgränze. Zwischen den Versuchsvarianten treten keine signifikanten Differenzen auf. Auch deutliche zeitliche Veränderungen waren nicht feststellbar (vergl. Anhang A-6,8,11,12).

5.3.5 Zeitliche und vertikale Variation der Cl^- - und SO_4^{2-} -S-Konzentrationen in GBL und WE

Die Konzentrationen von Cl und SO_4 -S in GBL und WE gehen mit der Bodentiefe zurück und sind durch die Behandlungen nicht beeinflusst. Zeitliche Veränderungen deuten sich im Juli und Oktober für Cl in der GBL im Oberboden auf allen Varianten und für SO_4 -S im WE nur auf Kontrolle und Volldüngung im Oberboden an. Im unteren Bereich ist kein deutlicher Trend zu erkennen (vergl. Anhang A-6,8,11,12).

5.3.6 Vergleich der Kationen- und Anionenäquivalentsummen und der prozentualen Anteile der Kationen (SKa in mmol IÄ/l) in der GBL

Abb. 9 zeigt die relativen Anteile einzelner Kationen an der Kationensumme (SKa) in der Gleichgewichtsbodenlösung (vergl. Anh. A-13).

Aus Abb. 9 geht hervor, daß die Summe der austauschbaren Kationen für die Prüfvarianten und Termine mit zunehmender Bodentiefe stark zurückgeht. Gleiches gilt für die Summe der Anionen (SAn), die hin-

ter der Kationensumme regelmäßig zurückbleibt. Die Summe der Kationen ist in 0-20 cm Tiefe durch Melioration regelmäßig erhöht und ändert sich während der Vegetationszeit kaum; die SAN dagegen schwankt im obersten Horizont von Juli zum Oktober stark. Kationenüberschüsse über die SAN lassen sich hauptsächlich auf den meliorierten Flächen in 0-10 cm Tiefe von April und Juli nachweisen. Sie sind vermutlich darauf zurückzuführen, daß bei meiner Analyse die Hydrogencarbonat-Ionen (und organische Säure-Anionen) nicht erfaßt wurden.

Betrachtet man die Anteile der einzelnen Kationen an ihrer Äquivalentsumme, so machen die säurebildenden Kationen Al und Fe in 0-10 cm Tiefe einen Anteil von rund 60-90 % aus. Im April und Juli erreichen sie auf den meliorierten Flächen zu unserer Überraschung sogar höhere Anteile als auf den Null-Parzellen. Ca dagegen ist auf den meliorierten Feldern in vergleichbarer Tiefenstufe mit rund 5-25 % vertreten und weist nach Melioration signifikant höhere Werte auf. Ca dominiert in 10-30 cm Tiefe unter den Kationen mit rund 40-55 % nach Melioration eindeutig, wobei Al und besonders Fe stark zurückgedrängt sind.

Im Unterboden fallen die relativ hohen Na- und K-Anteile an der SKa auf. Sie werden wahrscheinlich wegen ihrer geringen Bindungsstärke leicht ausgewaschen und befinden sich deshalb bevorzugt in der GEL.

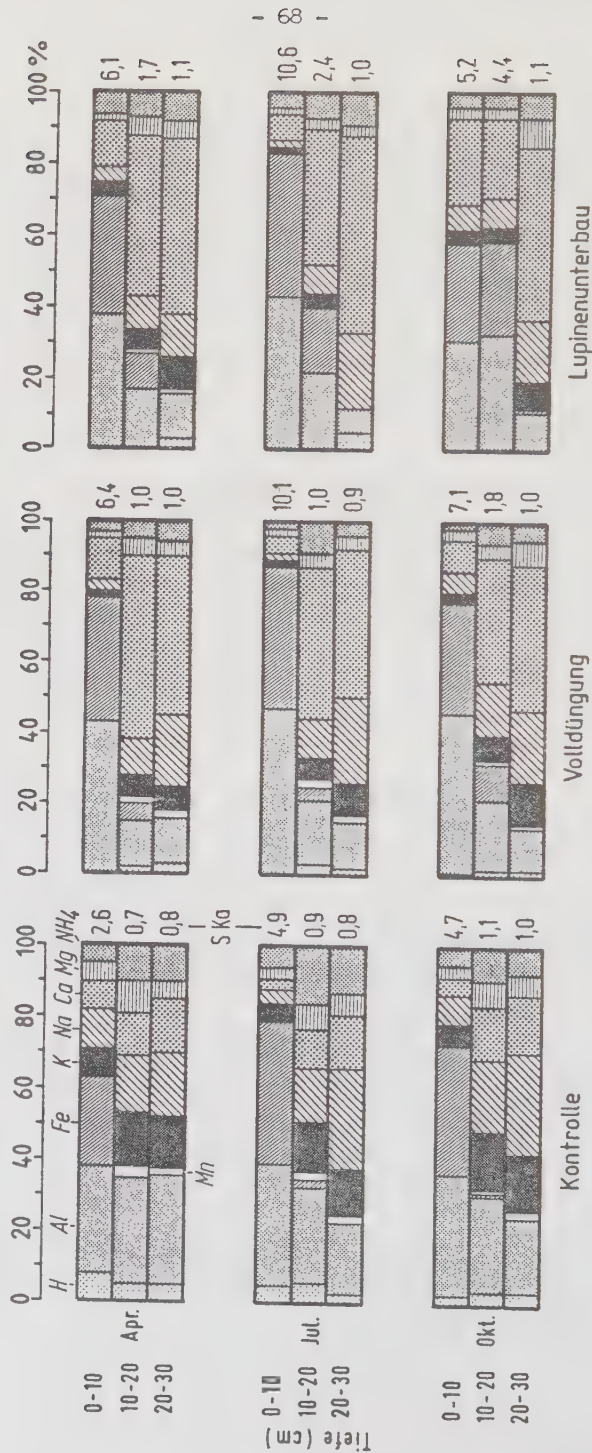
NH_4^+ -N, Mg und Mn sind an der SKa der GEL mit geringem und in dieser Reihenfolge abnehmendem Anteil beteiligt. Die Verläufe dieser Anteile zeigen weder Unterschiede im Hinblick auf Meliorationseffekte noch saisonale Veränderungen auf.

Während in 0-10 cm Tiefe die SO_4^{2-} -S-Anionen den größten Anteil an der SAN (rund 50-75 %) ausmachen, nähern sich im unteren Bodenbereich die Anteile von SO_4^{2-} -S- und Cl^- -Ionen an und erreichen jeweils etwa 50 %. NO_3^- -N ist nur in unbedeutendem Maße vertreten.

5.3.7 Vergleich der Kationen- und Anionenäquivalentsummen und der prozentualen Anteile der Kationen (SKa in mmol IÄ/l) im 2:1-Wasserextrakt

In Abb. 10 sind die Prozentanteile der einzelnen Kationen an der

Abb. 9: Prozentuale Anteile der einzelnen Kationen an der Kationensumme (SKa in mmol IÄ/l)
in der GBL. Versuch WAL 234



Tiefe (cm) 0-10 10-20 20-30

SKa 4,9 0,9 0,8

10,6 2,4 1,0

6,1 1,7 1,1

6,4 1,0 1,0

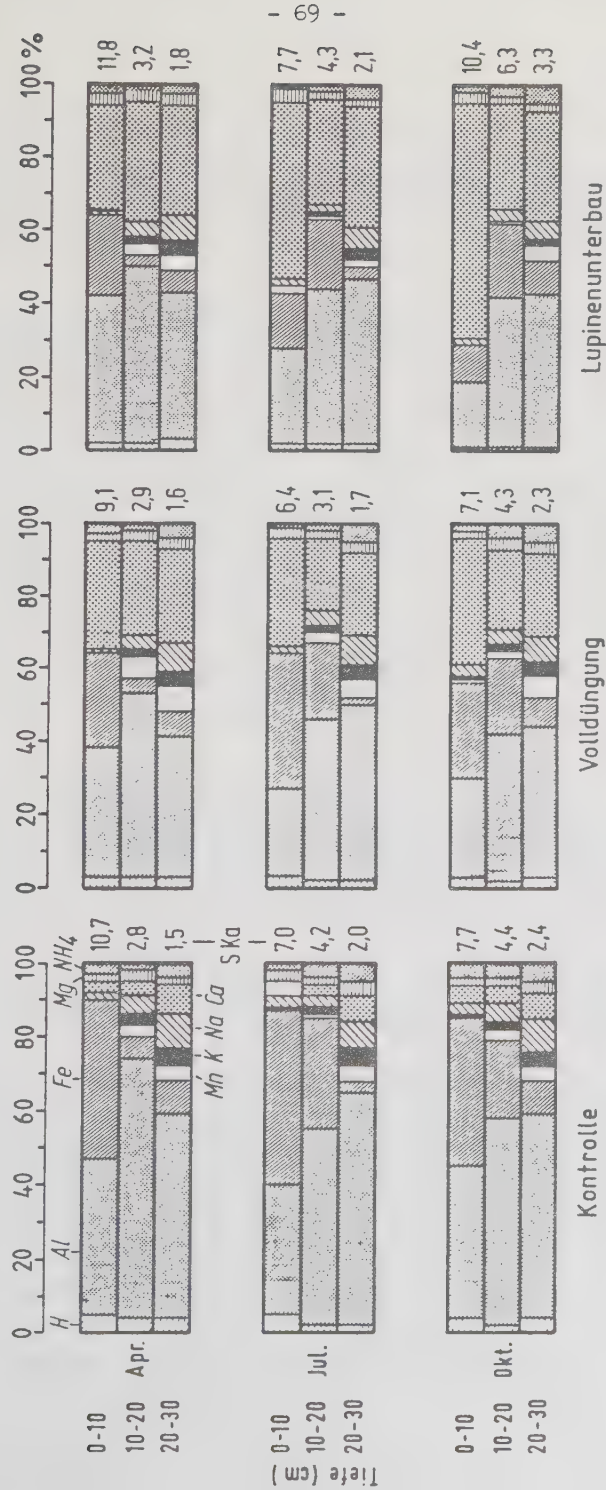
10,1 1,0 0,9

7,1 1,8 1,0

5,2 4,4 1,1

Kontrolle Volldüngung Lupinenunterbau

Abb. 10: Prozentuale Anteile der einzelnen Kationen an der Kationensumme (Ska in mmol IÄ/l)
im WE. Versuch WAL 234



SKa (mmol IÄ/l) im WE nach Termin und Tiefenstufe wiedergegeben.

Mit zunehmender Bodentiefe geht die Kationenäquivalentsumme im WE ebenso wie für die GBL zurück, wobei die SKa die SAN ebenfalls übersteigt. Jahreszeitliche Schwankungen beider Größen treten auf, sind aber schwer zu deuten.

Im Gegensatz zur GBL lassen sich im WE keine klaren Unterschiede in der Kationensumme zwischen den Versuchsgliedern nachweisen. Lediglich für die Lupinenvariante ist im Oktober ein leichter Anstieg feststellbar. Auch die Anionensumme variierte nur unwesentlich.

Al und Fe sind auf der Kontrolle mit zusammen ungefähr 80 % vor allem im obersten Horizont viel stärker als auf den meliorierten Parzellen an der SKa des WE beteiligt. Der Ca-Anteil an der SKa ist dagegen auf beiden meliorierten Varianten mit rund 30 % signifikant in allen Tiefenstufen und an allen Terminen erhöht. Während die Prozentanteile von Al und Ca in 10-20 cm Tiefe sich nicht wesentlich ändern, nimmt der Fe-Anteil mit der Bodentiefe deutlich ab.

Mg, K, Na, Mn und $\text{NH}_4\text{-N}$ erreichen jeweils nur sehr geringe Anteile an der SKa.

Das leicht lösliche Chlorid-Anion nimmt anteilmäßig mit der Profiltiefe zu, während der Anteil der $\text{SO}_4\text{-S}$ -Anionen sich verringert. Cl und $\text{SO}_4\text{-S}$ beteiligen sich mit rund 5-35 % bzw. 60-95 % an der SAN. $\text{NO}_3\text{-N}$ ist auch im WE kaum vorhanden (siehe auch Anhang A-13).

5.3.8 Molverhältnisse von Ca/Al, Ca/H, Mg/Al und Mg/Ca in der GBL und im 2:1-Wasserextrakt

Als Folge der Meliorationsmaßnahmen steigen auf den behandelten Flächen die Molverhältnisse von Ca/H, Ca/Al und Mg/Ca zu allen Terminen sowohl in der GBL als auch im WE eindeutig an. Signifikante Unterschiede zwischen den Prüfvarianten lassen sich mit beiden Methoden in der Regel bis 30 cm nachweisen (Ausnahme: Molverhältnis Ca/Al in der GBL in 0-10 cm Tiefe an allen Terminen) (vergl. Anh. A-10).

Das Molverhältnis Mg/Al weist behandlungsbedingten Anstieg im WE in 0-10 cm Tiefe auf. In der GBL war Mg/Al nur in 10-30 cm und im April erhöht. Gesicherte zeitliche Veränderungen der Molverhältnisse sind

in der Regel nicht feststellbar; eine signifikante Abnahme fand sich nur im Juli auf der Volldüngungsvariante nach der GBL-Methode.

5.4 Zusammenfassende Bewertung der eingesetzten Methoden hinsichtlich ihrer Aussagekraft für Meliorationseffekte im Versuch WAL 234

Meliorationsbedingte Veränderungen von Bodeneigenschaften ließen sich je nach Methode und Parameter eindeutig für die organische Auflage und für den mineralischen Oberboden bis etwa 20 cm Tiefe feststellen, da in diese Horizonte die Dünger entweder unmittelbar eingebracht, eingefräst (Variante Lupine) oder durch Sickerwasser-Transport bzw. Bioturbation (Volldüngung) verlagert wurden.

Die Methode des Gesamtaufschlusses ergab hauptsächlich für Calcium und Magnesium einen deutlichen Anstieg. Fe, Al und Mn waren dagegen nicht tangiert, weil die silikatisch gebundenen Fraktionen, die mit aufgeschlossen werden, dominieren und deren Menge sich nicht änderte.

Sowohl das Perkulations- als auch das Schüttelextraktverfahren wies für die Ausstattung mit austauschbaren basischen und sauren Kationen ganz eindeutige Meliorationseffekte nach. Für Ca und Mn stimmten die Ergebnisse beider Methoden gut überein, während die Perkulationsmethode mehr Fe und Al erfaßte als das Schüttelextraktverfahren. Letzteres erbrachte hingegen größere H-, in der organischen Auflage auch leicht erhöhte K- und Na-Gehalte. Die Mg-Gehalte lagen nach Schüttel-extraktion in der Auflage niedriger, im Mineralboden höher als nach Perkolation.

Sowohl in den Wasserextrakten als insbesondere auch in der GBL ließen sich bezüglich der Kationen- und Anionen-Konzentrationen beträchtliche saisonale Schwankungen erkennen, die allerdings wegen der hohen Streuung in der Regel nicht gesichert waren. Die Al- und Fe-Konzentrationen in der GBL waren im Oberboden der meliorierten Parzellen überraschenderweise erhöht (vor allem wohl in komplexer Bindung). Im WE traten im Gegensatz zur GBL erwartungsgemäß auf den meliorierten Flächen niedrigere Al- und Fe-Konzentrationen auf als auf den Kontrollparzellen. Die meliorationsbedingten Änderungen der Ca- und Mg-Konzentrationen wurden nach beiden Methoden gut erfaßt: auf den be-

handelten Parzellen waren selbst noch bis 30 cm Tiefe zu allen Jahreszeiten höhere Ca-Konzentrationen nachweisbar. Für Mg war ebenfalls eine Zunahme im Oberboden zu verzeichnen. Na, K und Mn in GBL und WE wurden indessen durch die Meliorationseingriffe kaum beeinflußt.

Aus den Anionen-Konzentrationen in der GBL und im WE konnten keine Schlußfolgerungen auf die Meliorationswirkungen gezogen werden.

6. Bodenchemische Auswertung des Versuchs WAL 228

6.1 Kennwerte der Bodenfestphase

In Tab. 24 sind die pH-Werte, die C_{org} -, N_t - und P_t -Gehalte sowie die C/N- und C/P-Verhältnisse für die Versuchsglieder des Experiments WAL 228 zusammengetragen (vergl. auch Anhang B-O).

6.1.1 pH-Werte

Auf beiden meliorierten Versuchsvarianten verminderte sich die Bodenazidität signifikant lediglich in der organischen Auflage und im Mineralboden 0-10 cm, wobei die pH-Werte nach Kalkstickstoff-Düngung (KSt) stärker anstiegen als nach Kalkammonsalpeter-Applikation (KAS).

6.1.2 Organischer Kohlenstoff

Nur auf den mit KSt meliorierten Parzellen ist eine geringfügige Abnahme der Kohlenstoffgehalte in der Auflage zu sichern. Im Mineralboden sind keine Unterschiede zwischen den Versuchsgliedern festzustellen. Als Trend scheint für die KAS-Variante eine leichte Minderung der C-Gehalte im Mineralboden auf.

6.1.3 Gesamt-Stickstoff und C_{org}/N_t -Verhältnisse

Eine signifikante Erhöhung der Stickstoff-Gehalte ist nur für die organische Auflage der gedüngten Flächen nachzuweisen. Im Mineralboden unterscheiden sich die N-Gehalte aller Versuchsglieder nicht voneinander.

Auf den meliorierten Flächen ging das C/N-Verhältnis in der Auflage von 36 auf etwa 30 zurück; der Rohhumus entwickelte sich zu einem günstigen Moder. Im Mineralboden traten keine signifikanten C/N-Veränderungen auf. Mit zunehmender Profiltiefe geht das C/N-Verhältnis überall stark zurück, was vermutlich auf NH_4 -Fixierung in den Zwischenschichtgittern zurückzuführen ist.

6.1.4 Gesamt-Phosphor und C_{org}/P_t -Verhältnisse

Eindeutig ist die bessere Ausstattung der organischen Auflage mit Phosphor auf den meliorierten Flächen. Diese höheren Gehalte dürften auf der P-Zufuhr durch Düngung beruhen. Im Mineralboden dagegen treten keine Unterschiede in den P_t -Gehalten auf.

Veränderungen der C/P-Verhältnisse beschränken sich ebenfalls auf die organische Auflage. Ihre Einengung ist auf der KSt-Variante deutlicher ausgeprägt als nach KAS-Düngung; dieser Befund weist auf eine stärker angeregte Bioturbation im Oberboden nach KSt-Applikation als Folge des höheren pH-Wertes hin.

6.1.5 Gesamtvorräte an Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor

Die Gesamtvorräte an C_{org} , N_t und P_t (organische Auflage und Mineralboden bis 30 cm Tiefe) sind in Tab. 25 dargestellt.

Die Mengen an organischem Kohlenstoff nahmen auf der KSt-Variante signifikant um 6 % zu, während jene auf der KAS-Variante nur geringfügig um rund 3 % zurückgingen. Nennenswerte Veränderungen der Humusvorräte konnten somit auf den meliorierten Flächen nicht beobachtet werden. Allerdings wurden durch die Melioration auf beiden Prüfgliedern günstigere Humusformen erzielt.

Die Stickstoffvorräte stiegen auf den gedüngten Varianten vor allem in der Auflage eindeutig an, wobei die KSt-Variante deutlich besser abschnitt (+ 8 %) als die KAS-Variante (+ 4 %).

Die Gesamtvorräte an Phosphor wurden dagegen durch die Melioration nicht verändert; der Eintrag durch Düngung (nur ca. 5 % der Ausgangsvorräte) war zu klein, um einen nachweisbaren Anstieg zu bewirken. Lediglich im Auflagehumus ergaben sich signifikante Unterschiede, wobei die P-Vorräte nach KSt-Düngung stärker zunahmen als auf der KAS-Variante.

6.1.6 Gesamtgehalte und -vorräte an Calcium, Magnesium und Kalium

Die Gesamtgehalte an Calcium, Magnesium und Kalium sind in Tab. 26 zusammengestellt (siehe auch Anhang B-1).

Tab. 24: pH-Werte, C_{org} -, N_t -, P_t -Gehalte (mg/g) und die C/N- und C/P-Verhältnisse der Versuchsglieder des Versuchs WAL 228
(Die Buchstaben kennzeichnen die Signifikanzen zwischen den Versuchsgliedern)

Tiefe (cm)		KON	KST	KAS
pH- H ₂ O	Auflage	3.4a	3.9b	3.7c
	00-10	3.3a	3.5b	3.4b
	10-20	4.0a	3.9a	4.0a
	20-30	4.2a	4.2a	4.1b
pH- CaCl ₂	Auflage	2.8a	3.4b	3.1c
	00-10	3.1a	3.2b	3.2a
	10-20	3.9a	3.8b	3.7b
	20-30	4.1a	4.1a	4.0b
C-org.	Auflage	486.8a	471.3b	480.0ab
	00-10	32.4a	36.2a	31.0a
	10-20	12.2a	12.3a	10.7b
	20-30	7.2a	7.4a	6.7a
N _t	Auflage	13.5a	16.0b	15.5b
	00-10	1.6a	1.7a	1.6a
	10-20	0.9a	0.8a	0.9a
	20-30	0.8a	0.8a	0.8a
C/N	Auflage	36.0a	29.5b	31.0c
	00-10	19.1a	21.7a	19.6a
	10-20	13.7a	13.8a	12.2a
	20-30	9.6a	9.7a	8.5a
P _t	Auflage	0.7a	1.1b	0.9c
	00-10	0.6a	0.6a	0.8a
	10-20	0.9a	0.6a	0.8a
	20-30	0.7a	0.8a	1.0a
C/P	Auflage	656.8a	451.1b	534.6ab
	00-10	54.2a	63.2a	39.7a
	10-20	15.1a	20.5a	13.4a
	20-30	10.8a	10.4a	7.4a

Tab. 25: Bioelementvorräte im Oberboden (org. Auflage und Mineralboden 0-30 cm) der Versuchsglieder des Versuchs WAL 228

(Die Buchstaben kennzeichnen die Signifikanzen zwischen den Versuchsgliedern)

	KON	KST	KAS
C t/ha	75.8a	80.4b	73.3a
N kg/ha	3649a	3980b	3799a
P kg/ha	1920a	1919a	2236a
Ca kg/ha	917a	1525b	1223c

Tab. 26: Ca-, Mg- und K-Gehalte (mg/g) der Versuchsglieder im Experiment WAL 228

(Die Buchstaben kennzeichnen die Signifikanzen zwischen den Versuchsgliedern)

Tiefe (cm)	KON	KST	KAS
Auflage	2.2a	7.0b	4.7c
Ca 00-10	0.3a	0.6b	0.5b
10-20	0.3a	0.3a	0.4b
20-30	0.3a	0.3b	0.3a
Auflage	0.7a	1.1b	0.9c
Mg 00-10	1.7a	1.7a	1.6b
10-20	1.6a	1.4a	1.5b
20-30	1.8a	1.8a	1.8a
Auflage	1.9a	2.5b	1.9a
K 00-10	25.5a	24.1a	24.9a
10-20	27.9a	25.8a	27.1a
20-30	26.4a	28.0a	28.3a

Die Kaliumgehalte sowie -vorräte stiegen im Vergleich zur Kontrollfläche nur auf der Kalkstickstoff-Variante und nur in der organischen Auflage signifikant an, was ebenfalls auf intensivere Beimischung von Mineralboden durch verstärkte Bioturbation hinweist.

Die Calciumgabe von insgesamt 1520 kg/ha auf der KSt- und 815 kg/ha auf der KAS-Variante hat sowohl die Gehalte als auch die Vorräte dieses Elements deutlich erhöht. Die Gehalte nahmen dabei vor allem im Auflagehumus und im Mineralboden 0-10 cm zu, wobei nach KSt deutlich höhere Werte zu verzeichnen waren als auf Prüfglied KAS. Im Unterboden (10-20 cm) war nur noch für KAS ein signifikanter Anstieg festzustellen. Die Calcium-Vorräte erhöhten sich nach KSt-Applikation um rund 40 % und durch die KAS-Melioration um rund 25 %. Für letzteres Versuchsglied ist jedoch die niedrigere Calcium-Zufuhr zu berücksichtigen. Von den gedüngten Mengen wurden auf der KSt- bzw. KAS-Variante 40,0 % bzw. 37,5 % wiedergefunden (vgl. Tab. 25).

Die Mg-Gehalte und -vorräte zeigen ein ähnliches Bild, das heißt signifikante Erhöhung in der Auflage beider Düngungsvarianten um rund 40 % bei der KSt- und 30 % bei der KAS-Variante. Im Mineralboden deutet sich ein gewisser Rückgang der Mg-Gehalte in der Bodentiefe 0-10 cm für Versuchsglied KAS und 10-20 cm für beide Meliorationsvarianten an. Bezüglich der Vorräte im Mineralboden ergaben sich jedoch keine signifikanten Veränderungen auf den gedüngten Flächen.

6.1.7 Gesamtgehalte und -vorräte an Mangan und Aluminium

Die Mn-Gehalte und -vorräte sind in der org. Auflage beider Düngungsvarianten im Vergleich zur Kontrollfläche signifikant erhöht. Dieser Befund läßt sich zum Teil mit der angeregten Bioturbation erklären.

Die Al-Gehalte und -vorräte wurden dagegen durch die Meliorations-eingriffe kaum beeinflusst. Lediglich in der organischen Auflage der KSt-Variante nahm Aluminium zu (vgl. Anhang B-1).

6.2 Kationenaustauscheigenschaften

6.2.1 Vergleich zwischen Perkolaten (1 M NH_4Cl) und Schüttel-extrakten (0,5 M NH_4Cl) zur Bestimmung von austauschbaren Kationen

Beide Methoden ergaben wie im Versuch WAL 234 übereinstimmende Ergebnisse für Ca und Mn. Das Schüttel-extraktverfahren lieferte dagegen für K und Na bedeutend höhere Werte als die Perkulationsmethode vor allem in der organischen Auflage.

Die Mg-Gehalte werden nach dem Perkulationsverfahren in der Auflage höher, im Mineralboden jedoch tiefer eingeschätzt als nach der Schüttel-extraktmethode.

Die Fe- und Al-Gehalte liegen nach Perkolation höher als nach Schüttel-extraktion. Die Unterschiede sind jedoch wegen der starken Streuung sowie wegen der geringen Freiheitsgrade nur selten signifikant.

Die H-Gehalte in der organischen Auflage stimmen nach beiden Verfahren ungefähr überein. Im Mineralboden hingegen sind die nach dem Schüttelverfahren bestimmten Werte indessen in der Regel überlegen.

Beide Methoden lieferten insgesamt etwa gleiche KAK-Werte, doch wurde die Basensättigung nach dem Schüttel-extraktverfahren generell und vielfach sogar signifikant höher eingeschätzt. (vergl. Anh. B-2).

6.2.2 Überprüfung der Meliorationswirkungen auf Kationen-austauschkapazität und Basensättigung

In den Tabellen 27 und 28 sind die KAK-Werte sowie die Basensättigungswerte der Versuchsglieder aufgeführt (siehe auch Anh. B-3,4).

Die KAK nimmt mit zunehmender Bodentiefe entsprechend dem Rückgang der Humusgehalte merklich ab. Der signifikant höchste KAK-Wert wurde für die organische Auflage der KSt-Variante nachgewiesen. Unterschiede in der KAK zwischen den Prüfgliedern traten im Mineralboden nicht auf.

Die Basenzufuhr bewirkte bei den gedüngten Varianten eine höhere Basensättigung bis zu einer Tiefe von etwa 30 cm. Gesicherte Diffe-

renzen liegen allerdings nur in der organischen Auflage und in 0-10 cm vor. In diesen Tiefenstufen stieg die Basensättigung auf der KSt-Variante wegen der höheren Basengabe stärker an als auf der KAS-Variante.

6.2.3 Überprüfung der Meliorationswirkungen auf die Ionen-sättigungen mit beiden Methoden der KAK-Bestimmung

Die prozentualen Anteile der einzelnen Kationen an der KAK nach beiden Bestimmungsmethoden sind in Abb. 11 und Tab. 27 und 28 zusammengestellt (vergl. auch Anhang B-3,4,5).

H, Al und Ca dominieren im Kationenbelag sowohl nach dem Perkulations- als auch nach dem Schüttelextraktverfahren. Der Prozentanteil von Ca geht auf beiden gedüngten Varianten mit zunehmender Tiefe zugunsten des Al stark zurück. Die Perkulationsmethode wies für den Mineralboden einen höheren Al-Anteil nach als das Schüttelextraktverfahren; dieses lieferte dagegen in diesem Solumbereich eine höhere H^+ -Sättigung.

Mg ist in der Auflage mit einem Anteil von jeweils rund 4 % vertreten; beide Bestimmungsmethoden wiesen lediglich für die Bodentiefe 0-10 cm einen leichten Anstieg durch Melioration nach.

K, Na und Mn erreichen gewöhnlich nur einen sehr geringen Anteil an der KAK ohne signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsgliedern. Auffallend ist die hohe Fe-Sättigung (rund 8 bzw. 17 %) in der Tiefe 0-10 cm. In der organischen Auflage konnte für Fe nur nach dem Schüttelverfahren eine Reduktion gesichert werden. Die Melioration führte dagegen sowohl auf der KAS- als auch auf der KSt-Variante zu einer signifikanten Minderung der H- und Al-Sättigung in der organischen Auflage. Für den Mineralboden ergab sich nur ein Trend zu niedrigeren Werten auf den meliorierten Parzellen.

Die Ca-Sättigung ist dagegen auf beiden gedüngten Versuchsgliedern gegenüber den Kontrollflächen bis 30 cm Mineralbodentiefe deutlich überlegen, signifikant allerdings nur in der organischen Auflage und im mineralischen Oberboden bis 20 cm, wobei die KSt-Variante dank höherer Basenzufuhr besser abschneidet. Beide Bestimmungsverfahren spiegelten den Einfluß der Melioration auf die Ca-Sättigung in ähnlicher Weise wider.

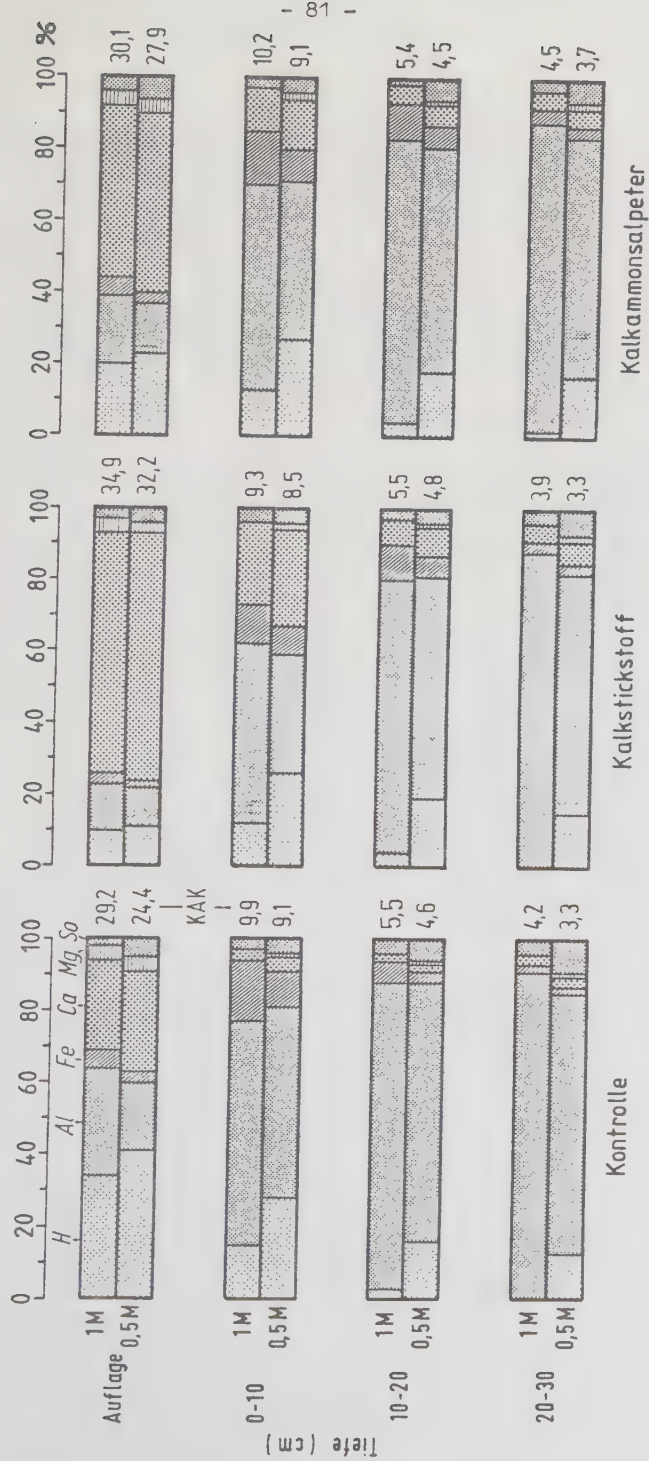
Tab. 27: Prozentuale Anteile von H^+ , Al^{3+} und Ca^{2+} an der KAK und Basensättigung für die Versuchsglieder nach der Perkolationsmethode (1 M NH_4Cl).
Experiment WAL 228
(Die Buchstaben kennzeichnen die Signifikanz zwischen den Versuchsgliedern)

Tiefe (cm)	H(%)			Al(%)			Ca (%)			Basensättigung(%)						KAK(mmol/lA/100g.)		
	KON	KST	KAS	KON	KST	KAS	KON	KST	KAS	KON	KST	KAS	KON	KST	KAS	KON	KST	KAS
Auflage	33.9a	10.2b	20.4b	30.3a	13.2b	19.2a	24.6a	66.9b	48.0c	29.5a	71.1b	53.5c	29.2a	34.9b	30.1ab			
00-10	14.8a	11.7a	12.8a	62.4a	48.8a	57.4a	3.3a	23.4b	12.2c	5.4a	25.7b	14.4c	9.9a	9.4a	10.2a			
10-20	3.3a	4.3a	4.1a	85.1a	76.2a	78.5a	2.4a	6.8b	4.5c	4.2a	8.6a	6.4a	5.5a	5.5a	5.4a			
20-30	0.8a	1.1a	2.2a	90.3a	86.8a	86.0a	3.2a	4.9a	4.7a	5.1a	6.4a	6.3a	4.2a	4.2a	4.5a			

Tab. 28: Prozentuale Anteile von H^+ , Al^{3+} und Ca^{2+} an der KAK und Basensättigung für die Versuchsglieder nach der Schütteleextraktmethode (0,5 M NH_4Cl).
Experiment WAL 228
(Die Buchstaben kennzeichnen die Signifikanz zwischen den Versuchsgliedern)

Tiefe (cm)	H(%)			Al(%)			Ca (%)			Basensättigung(%)						KAK(mmol/lA/100g.)		
	KON	KST	KAS	KON	KST	KAS	KON	KST	KAS	KON	KST	KAS	KON	KST	KAS	KON	KST	KAS
Auflage	40.7a	11.2b	23.3b	19.2a	9.3b	14.3a	28.1a	69.1b	49.9c	35.3a	75.3b	56.9c	24.4a	32.2b	27.8ab			
00-10	27.7a	25.5a	26.8a	53.0a	32.7a	43.8a	3.7a	26.8b	14.3c	8.9a	33.2b	19.5c	9.1a	8.5a	9.1a			
10-20	15.8a	18.6a	17.8a	71.6a	61.6a	62.8a	2.4a	8.1b	5.6c	8.4a	14.0a	13.2a	4.6a	4.8a	4.5a			
20-30	12.6a	14.8a	16.7a	71.8a	67.1a	66.9a	3.3a	6.0a	5.3a	12.2a	15.1a	13.2a	3.3a	3.3a	3.7a			

Abb. 11: Prozentuale Anteile der einzelnen Kationen an der KAK (mmol IÄ/100 g) nach Perkolation
(1 M NH_4Cl) und Schüttelextraktion (0,5 M NH_4Cl). Versuch WAL 228



Tiefe (cm)

Tab. 29: Vorräte an austauschbaren Kationen in organischer Auflage und Mineralboden (0-30 cm) der Versuchsglieder nach beiden KAK-Methoden (in kmol IÄ/ha). Experiment WAL 228

		Perkolationsmethode			Schüttel-extraktmethode		
		KON	KST	KAS	KON	KST	KAS
H	org. Aufl.	7.0	2.6	4.4	6.8	2.7	4.7
	0-30 cm	12.7	10.8	12.6	29.0	29.2	31.1
	Gesamt	19.7	13.4	17.0	35.8	31.9	35.8
Al	org. Aufl.	6.3	3.3	4.2	3.3	2.2	2.9
	0-30 cm	120.1	105.2	117.4	86.3	67.1	77.5
	Gesamt	126.4	108.5	121.6	89.6	69.3	80.4
Fe	org. Aufl.	1.0	0.7	1.0	0.5	0.4	0.6
	0-30 cm	16.3	15.8	19.6	8.9	8.5	9.4
	Gesamt	17.3	16.5	18.6	9.4	8.9	10.0
Ca	org. Aufl.	5.1	17.3	10.4	4.8	16.5	10.0
	0-30 cm	4.7	21.7	14.4	11.4	22.6	13.7
	Gesamt	9.8	39.0	24.8	16.2	39.1	23.7
Mg	org. Aufl.	0.7	0.9	0.9	0.6	0.8	0.8
	0-30 cm	0.8	1.1	1.2	1.6	2.1	2.3
	Gesamt	1.5	2.0	2.1	2.2	2.9	3.1
Mn	org. Aufl.	0.3	0.5	0.5	0.3	0.6	0.5
	0-30 cm	1.2	1.5	1.2	0.9	0.3	0.6
	Gesamt	1.5	2.0	1.6	1.2	0.9	1.1
K	org. Aufl.	0.2	0.2	0.2	0.5	0.5	0.5
	0-30 cm	0.7	0.8	1.2	3.6	2.2	2.2
	Gesamt	0.9	1.0	1.4	4.1	2.7	2.7
Na	org. Aufl.	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1
	0-30 cm	1.4	1.8	1.7	4.7	5.3	4.7
	Gesamt	1.5	1.9	1.8	4.9	5.5	4.8

6.2.4 Molverhältnisse von Ca/Al, Ca/H, Mg/Al und Basen/Säure-Verhältnisse (B/S) am Austausch

Beide Bestimmungsmethoden wiesen für die meliorierten Versuchsglieder einen Anstieg der Molverhältnisse von Ca/Al und Ca/H bis 20 cm Tiefe nach. Das Molverhältnis von Mg/Al sowie das B/S-Verhältnis sind hingegen auf den gedüngten Flächen nur in der Auflage und im Mineralboden bis 10 cm deutlich erhöht (vergl. Anhang B-3,4).

6.2.5 Vorräte an austauschbaren Kationen in organischer Auflage und Mineralboden (0-30 cm) nach beiden KAK-Methoden

In Tab. 29 sind die Vorräte an austauschbaren Kationen nach beiden KAK-Bestimmungsmethoden aufgeführt (vergl. auch Anhang B-3,4).

Nach der Perkulationsmethode liegen die Vorräte an Fe und Al im Mineralboden höher als die nach dem Schüttelverfahren bestimmten Vergleichswerte. Dagegen weist das Schüttelverfahren im Mineralboden höhere H-, K-, Na- und (leicht erhöhte) Mg-Vorräte nach. Für die Ca- und Mn-Vorräte lieferten beide Verfahren etwa gleiche Ergebnisse.

Im Bezug auf die Meliorationseffekte läßt sich eine signifikante Zunahme der Ca-Vorräte vor allem auf der KSt-Variante erkennen. Auch der Mg-Vorrat ist gestiegen. Die Vorräte an H, Fe und Al sind dagegen nur in der organischen Auflage deutlich vermindert; im Mineralboden gingen sie lediglich tendenziell zurück.

Für Mn, K und Na lassen sich keine eindeutigen meliorationsbedingten Veränderungen nachweisen.

6.3 Kennwerte der Bodenlösung

6.3.1 Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der pH-Werte in GBL und WE

Abb. 12 zeigt den saisonalen Verlauf und die Vertikalgradienten der pH-Werte in GBL und WE.

Die pH-Werte steigen in beiden Lösungen mit zunehmender Bodentiefe merklich an. Allerdings liegen die pH-Werte des Wasserextrakts

(3,2-4,2) in einem niedrigeren Bereich als jene der GBL (3,6-4,7). Der gleiche Befund wurde auch für den Versuch WAL 234 festgestellt und kurz begründet (siehe 5.3.1).

Sowohl in der GBL als auch im WE treten saisonale Veränderungen der pH-Werte auf. So ist im Oberboden (0-10 cm) fast überall im Vergleich zum April ein ähnlicher Anstieg im Juli und Oktober festzustellen; diese Verschiebungen sind zum größeren Teil signifikant und vermutlich durch wechselnde Intensität der biologischen Aktivität begründet. Im unteren Mineralboden (10-30 cm) sind dagegen keine signifikanten Unterschiede zu erkennen.

Meliorationsbedingte Veränderungen sind nach beiden Verfahren ebenfalls auf die obersten 10 cm Bodentiefe beschränkt. Die pH-Werte in GBL und WE liegen auf den gedüngten Flächen im Schnitt um 0,2 Einheiten über den Vergleichswerten; hierbei weist die KSt-Variante im Juli und Oktober höhere pH-Werte auf als die KAS-Variante, was mit stärker angestiegener Ca-Sättigung an den Kationenaustauschern übereinstimmt.

6.3.2 Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der Aluminium-, Eisen- und Mangan-Konzentrationen in GBL und WE

Die Abb. 13 und 14 informieren über die zeitliche Variation und die Vertikalgradienten der Al- und Fe-Konzentrationen in GBL und WE.

In beiden Lösungen gehen die Al- und Fe-Konzentrationen mit der Profiltiefe deutlich zurück, während die pH-Werte ansteigen.

Signifikante zeitliche Veränderungen sind in der GBL für Al und Fe nicht zu beobachten. Nach der WE-Methode ist auf der KSt-Variante in der Profilstufe 0-10 cm lediglich für Fe eine Minderung der Konzentration im Juli und Oktober gegenüber April sowie auf dem Versuchsglied KAS eine Erhöhung im Oktober im Bodenbereich 10-30 cm nachzuweisen.

Meliorationsbedingte Veränderungen lassen sich für die GBL nur im Oberboden 0-10 cm der KSt-Variante und nur im Juli feststellen in der Weise, daß die Al- und Fe-Konzentrationen der gedüngten Parzellen über denen der Kontrollflächen liegen. Eine ähnliche Beobachtung liegt

für die meliorierten Varianten des Versuchs WAL 234 vor.

Im WE hingegen sind Al und Fe im Oberboden 0-10 cm der Kontrollparzellen höher konzentriert, jedoch ist die Differenz nicht statistisch gesichert.

Die Mn-Konzentrationen in GEL und WE bleiben während der gesamten Meßzeit und für jede Tiefenstufe praktisch unverändert; Meliorationseffekte waren nicht zu erkennen (siehe Anhang B-6,7,9,10).

6.3.3 Zeitliche und vertikale Variation der Calcium-, Magnesium-, Natrium- und Kalium-Konzentrationen in GEL und WE

In Abb. 13 und 14 sind die Verläufe der Ca-Konzentrationen dargestellt.

Die Konzentrationen von Ca, Mg, Na und K sinken im allgemeinen deutlich mit zunehmender Bodentiefe (vergl. Anhang B-6,7,9,10).

Für das Ca-Niveau in GEL und WE ergaben sich keine signifikanten zeitlichen Veränderungen. Als Trend nur war in der GEL ein schwaches Absinken der Ca-Konzentration im Juli zu erkennen, dem im Herbst besonders auf der KSt-Variante ein Wiederanstieg folgte. Auch im WE des KSt-Prüfgebietes ging die Ca-Konzentration im Sommer zurück, um im Herbst erneut zuzunehmen. Für Versuchsglied KAS fand sich dagegen von April bis Oktober eine Tendenz zur Reduktion der Ca-Werte im WE.

Klare Düngungseffekte lassen sich für Calcium in GEL und WE feststellen; die Konzentrationen liegen auf den meliorierten Parzellen im Oberboden bis 30 cm Tiefe deutlich über den Kontrollwerten. Dabei erhöhte sich die Ca-Konzentration auf der KSt-Variante stärker als auf der KAS-Variante. Signifikante Unterschiede traten sowohl in der GEL bis 30 cm Tiefe als auch im WE bis 20 cm Tiefe zu allen Terminen auf.

Die Düngung hat die Mg-Konzentrationen in der GEL nur im Oberboden und im Frühjahr signifikant beeinflusst. Im WE zeigt sich als Trend eine deutliche Zunahme. Das Mg-Niveau blieb während der gesamten Meßzeit auf der Kontroll- und KAS-Variante relativ konstant. Für das Versuchsglied KSt war dagegen im WE bis 30 cm Tiefe gegenüber April ein Rückgang der Konzentrationen im Juli und Oktober zu verzeichnen.

Abb. 12: Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der pH-Werte in der Gleichgewichtsbodenlösung (GBL) und im 2:1-Wasserextrakt (WE); Versuch WAL 228

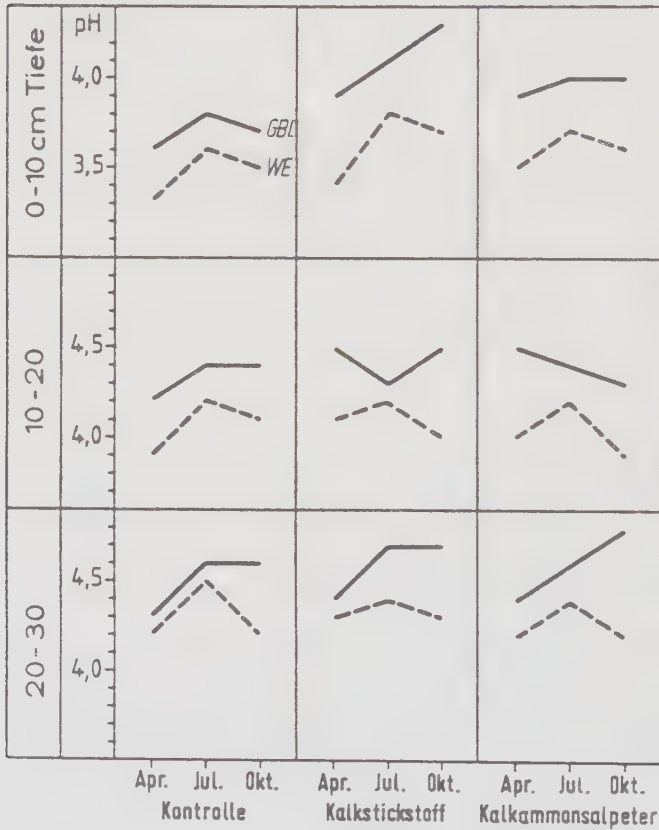


Abb. 13: Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der Aluminium-, Eisen- und Calcium-Konzentrationen (mg/l) in der GBL; Versuch WAL 228

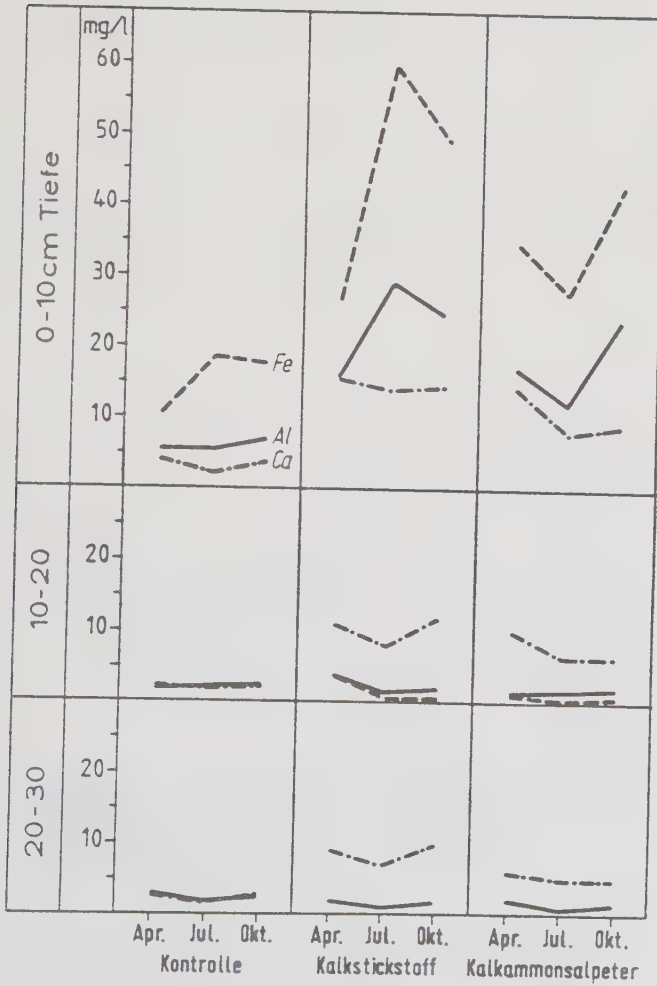
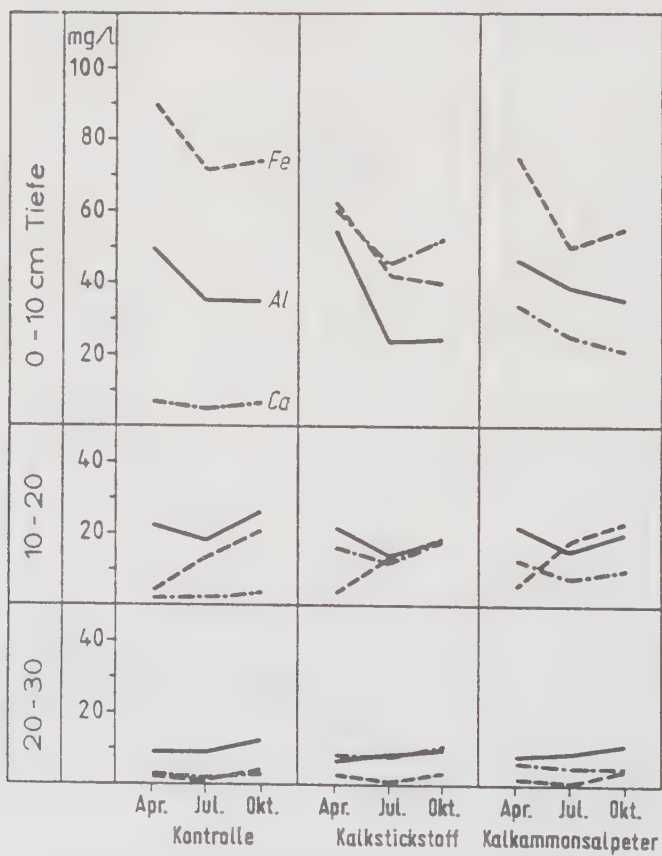


Abb. 14: Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der Aluminium-, Eisen- und Calcium-Konzentrationen (mg/l) im WE; Versuch WAL 228



Na und K ließen im allgemeinen weder deutliche zeitliche Veränderungen noch Meliorationseffekte erkennen. Für Na ergaben sich signifikante zeitliche Veränderungen im Herbst im unteren Bodenbereich der KAS-Variante.

6.3.4 Zeitliche und vertikale Variation der NH_4^+ -N- und NO_3^- -N-Konzentrationen in GBL und WE

In GBL und WE gehen die NH_4 -N- und NO_3 -N-Konzentrationen im allgemeinen mit zunehmender Profiltiefe zurück. Allerdings ist NO_3 -N überhaupt nur in einzelnen Tiefenstufen nachweisbar. Die Meliorationseingriffe wirkten sich auf NH_4 -N und NO_3 -N in beiden Lösungen nicht signifikant aus. Zeitliche Schwankungen waren nicht zu erkennen (vergl. Anhang B-6,7,9,10).

6.3.5 Zeitliche und vertikale Variation der Cl- und SO_4^{2-} -S-Konzentrationen in GBL und WE

Die Konzentrationen von Cl und SO_4^{2-} -S sinken generell mit der Bodentiefe; unterhalb von 10 cm bleiben die Cl-Konzentrationen nahezu konstant, während SO_4 -S weiter abnimmt.

Cl und SO_4 -S in GBL und WE sind durch die Melioration nicht beeinflusst. Ihre Konzentrationen weisen auch im zeitlichen Ablauf keinen übereinstimmenden Trend auf. Nur im Oberboden der KAS-Variante waren signifikante Verschiebungen im Juli und Oktober im Vergleich zum April zu beobachten (vergl. Anhang B-6,7,9,10).

6.3.6 Vergleich der Kationen- und Anionenäquivalentsummen und der prozentualen Anteile der Kationen (SKa in mmol IÄ/l) in der GBL

In Abb. 15 sind die Prozentanteile der einzelnen Kationen an der SKa nach Entnahmeterrain und Tiefenstufe wiedergegeben (s. Anh.B-11).

Mit zunehmender Bodentiefe geht die SKa zurück, wobei ab 10-30 cm Tiefe die Veränderungen nur noch sehr gering sind. Auffällig sind

die Überschüsse der Kationen (1-2-fach) vor allem im Oberboden der gedüngten Flächen an allen Terminen. Dieselbe Erscheinung war im Versuch WAL 234 zu beobachten und dürfte vor allem darauf beruhen, daß die Hydrogencarbonat-Ionen und organischen Anionen, die in diesem pH-Bereich zu erwarten sind (mündl. Hinweis, Prof. Dr. KREUTZER), nicht bestimmt wurden. Gesicherte zeitliche Veränderungen der SKa traten nicht auf.

Die Anionensumme unterliegt weder zeitlichen Variationen noch Meliorationseinflüssen.

Die Kationen/Anionen-Verhältnisse weisen als Tendenz einen Kationen-Überschuß für die Monate April und Juli in 0-20 cm Tiefe, für Oktober in 0-10 cm Tiefe nach. Zeitliche Veränderungen waren im Juli in 0-10 cm Bodentiefe auf der KSt-Variante zu sichern.

Hinsichtlich der prozentualen Zusammensetzung der GBL im Oberboden nehmen Al und Fe auch auf den gedüngten Flächen den überragenden Anteil ein. Er variierte während der Meßzeit zwischen 65 und 82 % (auf der Kontrollvariante rund 56 %). Obwohl Ca auf allen Flächen nur untergeordnet vertreten ist, ergeben sich für alle Termine gesicherte Differenzen zwischen den Behandlungen. Im unteren Bodenbereich der gedüngten Parzellen steigt der Anteil von Ca an der GBL (rund 40 %) eindeutig an, während der Al-Anteil allmählich, jener von Fe drastisch mit der Bodentiefe zurückgeht.

Die Na- und K-Anteile nehmen mit der Profiltiefe deutlich zu. Dieser Befund wurde bereits für den Versuch WAL 234 festgestellt und erklärt (vgl. 5.3.6).

NH₄-N, Mg und Mn treten nur in Spuren auf; ihr Anteil ist durch die Meliorationseingriffe kaum beeinflusst.

An der Anionensumme ist SO₄-S je nach Termin mit rund 50 bis 70 %, Cl mit rund 30 bis 50 % beteiligt. Für SO₄-S zeichnet sich ein schwacher Trend zu höheren Werten auf den gedüngten Flächen ab. NO₃-N-Anteile sind kaum nachweisbar.

6.3.7 Vergleich der Kationen- und Anionenäquivalentsummen und der prozentualen Anteile der Kationen (SKa in mmol IÄ/l) im WE

Abb. 16 zeigt die relativen Anteile einzelner Kationen an der SKa im WE getrennt nach Entnahmetermin und Tiefenstufe (s.auch Anh.B-11).

Mit zunehmender Bodentiefe nehmen die Summen von Kationen und Anionen im WE wie in der GEL allmählich ab, wobei die SKa gewöhnlich die SAN übertrifft. Zwischen den Versuchsgliedern lassen sich für beide Größen und für alle Entnahmetermine und Tiefenstufen keine gesicherten Unterschiede beobachten. Lediglich auf der Kontrollvariante weist die SKa ein leicht erhöhtes Niveau gegenüber den gedüngten Parzellen auf.

Zeitlich gesehen geht die SKa im Oberboden von April über Juli bis in den Oktober zurück, während die SAN nur im Oktober etwas unter den Vergleichswerten im April liegt.

Al und Fe nehmen wiederum im Oberboden den höchsten Anteil an der SKa im WE ein. Im Gegensatz zur GEL sind sie jedoch auf der Kontrollfläche erwartungsgemäß höher beteiligt (ca. 70-85 %) als auf den meliorierten Parzellen (ca. 45-75 %). Zwischen den Versuchsvarianten ergaben sich jedoch keine signifikanten Differenzen.

Für Ca dagegen ist nach Melioration ein eindeutiger Anstieg des Anteils an der SKa (auf rund 20 %) bis zu einer Tiefe von 30 cm nachzuweisen; diese Zunahme ist auf der KSt-Variante größer als für Prüfglied KAS.

Mit zunehmender Bodentiefe nimmt der Al-Anteil an der SKa (WE) allmählich zu, die Fe-Beteiligung dagegen rapide ab, während der Ca-Anteil nahezu konstant bleibt.

NH_4^+ -N, Na, K, Mg und Mn sind nur mit wenigen Prozent an der SKa beteiligt. Die prozentualen Anteile von NH_4^+ -N, Na, K und Mn steigen mit zunehmender Bodentiefe geringfügig an; Mg ändert sich kaum.

Während der SO_4^{2-} -S-Anteil mit der Tiefe sinkt, steigt jener von Cl deutlich an. SO_4^{2-} -S und Cl machen rund 20 bzw. 80 % der SAN aus.

Abb. 15: Prozentuale Anteile der einzelnen Kationen an der Kationensumme (Ska in mmol IÄ/l) in der GRL. Versuch WAL 228

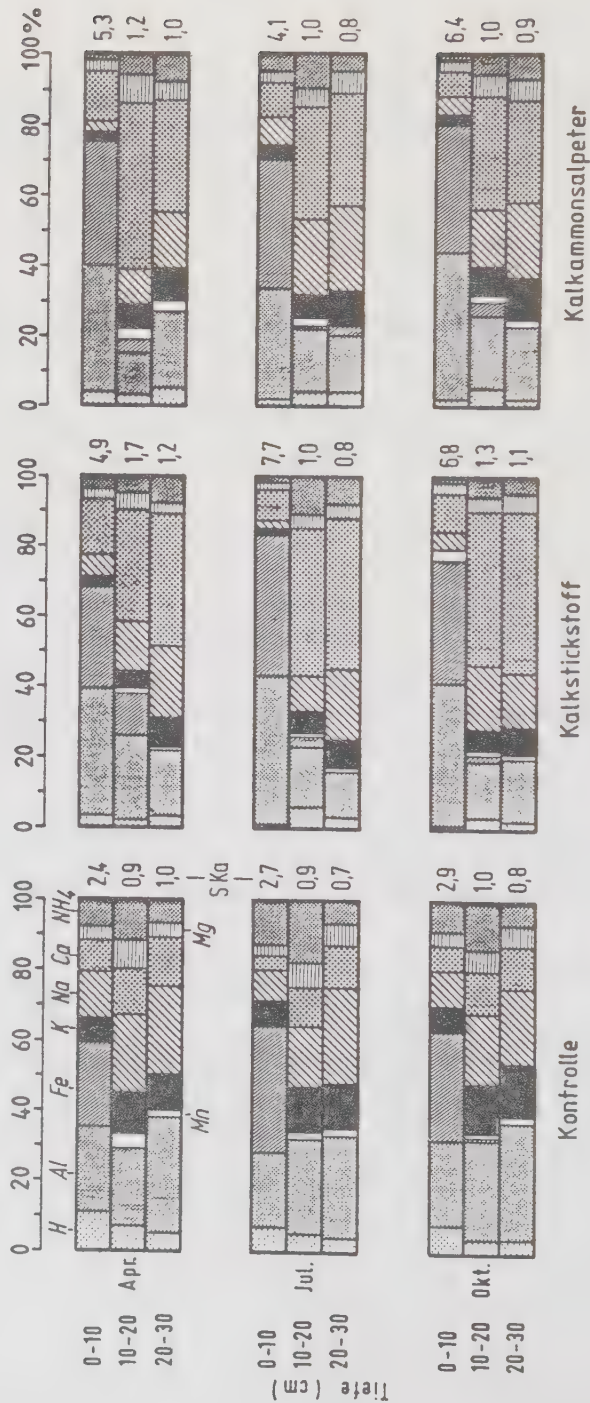
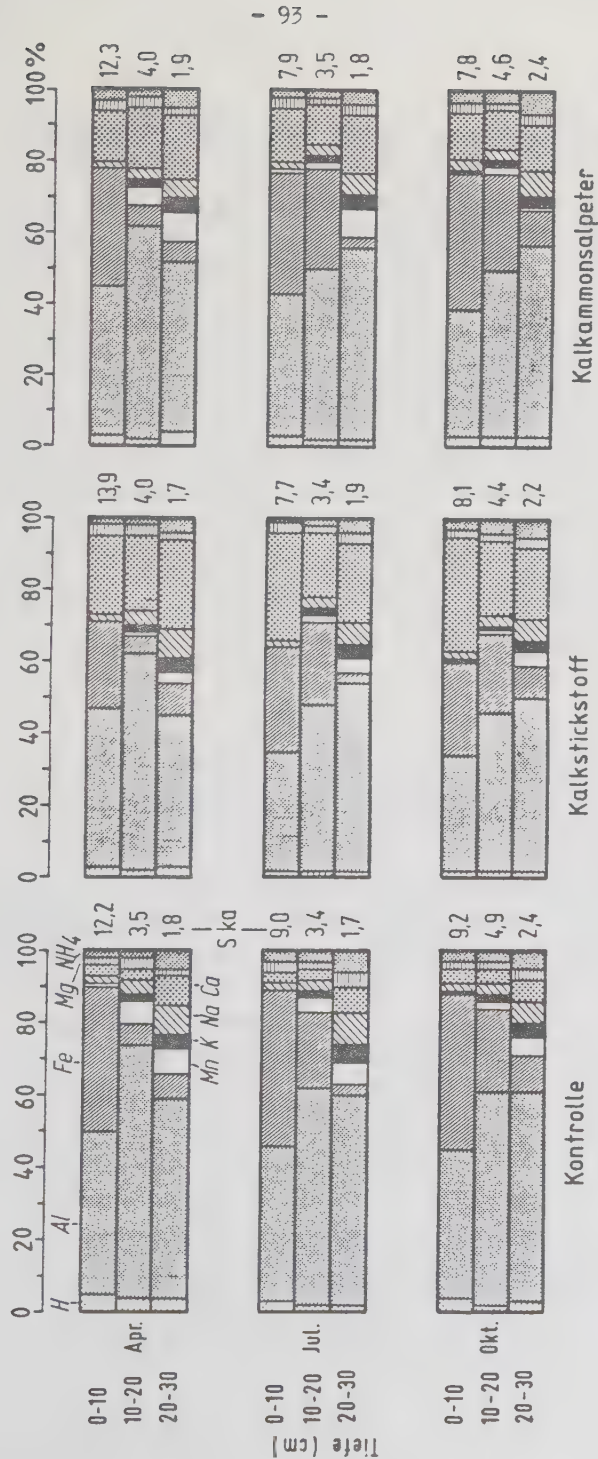


Abb. 16: Prozentuale Anteile der einzelnen Kationen an der Kationensumme (SKa in mmol IÄ/l)
im WE. Versuch WAL 228



6.3.8 Molverhältnisse von Ca/Al, Ca/H, Mg/Al und Mg/Ca in der GBL und im 2:1-Wasserextrakt

In beiden Lösungen liegen die Molverhältnisse von Ca/H und Mg/Ca in allen Horizonten und an allen Entnahmetermen auf den gedüngten Varianten wesentlich höher als auf den Kontrollflächen, wobei sie auf der KSt-Variante stärker anstiegen als auf dem Versuchsglied KAS. Die Ca/Al-Verhältnisse in der GBL weisen lediglich im unteren Bodenbereich (10-30 cm) signifikante Differenzen zwischen den Versuchsgliedern auf. Im WE dagegen sind im ganzen Profil und an fast allen Entnahmetermen Unterschiede feststellbar (Ausnahme: Oberboden im April). Bei den Mg/Al-Verhältnissen von GBL und WE treten signifikante Veränderungen durch die Düngung nur im Oberboden und im Juli/Oktobre auf (vergl. Anhang B-8).

Was die zeitlichen Variationen der genannten Molverhältnisse betrifft, so ist aufgrund der erheblichen Schwankungen kein eindeutiger Trend zu erkennen.

6.4 Zusammenfassende Bewertung der eingesetzten Methoden hinsichtlich ihrer Aussagekraft für Meliorationseffekte im Versuch WAL 228

Auf beiden Meliorationsvarianten sind in der organischen Auflage als Folge der Düngung deutliche Unterschiede in den Gesamtgehalten gegenüber der Kontrolle festzustellen. Im Mineralboden 0-10 cm sind dagegen nur auf der KSt-Variante nennenswerte Veränderungen eingetreten, was wohl hauptsächlich auf der etwas höheren Basenzufuhr und einer dadurch stärkeren Anregung der Bioturbation beruhen dürfte.

Die Gesamtgehalte an K und Mg in der organischen Auflage stiegen auf der KSt-Variante an. Auch die Ca-Gehalte der O-Horizonte wurden durch die Melioration deutlich erhöht; die Verbesserung reichte auf Prüfglied KSt sogar in die Tiefenstufe 0-10 cm hinein.

Beide KAK-Methoden lieferten ähnliche Informationen über die Auswirkung der Düngung. In der organischen Auflage wurden das austauschbare H, Al und Fe auf der KSt-Variante zurückgedrängt. Außerdem waren die KAK-Werte sowie die Basensättigung im O-Horizont erhöht. Die

Melioration bewirkte vor allem auf der KSt-Variante eine deutliche Zunahme des austauschbaren Calciums in der organischen Auflage und im Mineralboden bis 20 cm Tiefe. Das austauschbare Na, K und Mn wurden dagegen durch die Düngung nicht beeinflusst. Für Mg war in der Bodentiefe 10-20 cm mit beiden Methoden der KAK-Bestimmung eine leichte Zunahme für die KSt-Variante zu verzeichnen.

Beide KAK-Methoden lieferten übereinstimmende Werte für Ca und Mn. Fe und Al indessen werden nach dem Perkulationsverfahren höher eingeschätzt als nach dem Schüttelextraktverfahren. Letzteres weist dafür überlegene Σ - sowie in der organischen Auflage auch höhere K- und Na-Gehalte nach. Auch für Mg werden nach dieser Methode im Mineralboden höhere Werte gefunden.

Meliorationsbedingte Veränderungen wurden für Ca in GBL und WE in der Regel bis zu einer Tiefe von 30 cm an allen Entnahmeterminen festgestellt. Mg in der GBL wurde lediglich im Oberboden der KSt-Variante signifikant beeinflusst. Dagegen veränderten die Meliorationseingriffe die K-, Na und Mn-Gehalte in beiden Lösungen kaum. Für Al u. Fe (GBL) waren gegenüber den Kontrollwerten signifikante Erhöhungen auf der KSt-Variante nur im Juli zu beobachten. Im WE hingegen sind tendenziell höhere Al- und Fe-Konzentrationen auf der Kontrollvariante zu verzeichnen, was im Gegenteil zur GBL die Interpretation der Al- und Fe-Konzentrationen erleichtert. Ca und Mg werden nach beiden Methoden in gleicher Weise erfaßt.

Die Anionen-Konzentrationen in der GBL und im WE, die starke zeitliche Schwankungen aufweisen, waren durch die Meliorationseingriffe nicht signifikant verändert.

7. Bodenchemische Auswertung des Versuchs Archenohe

7.1 Kennwerte der Bodenfestphase

Tab. 30 informiert über die pH-Werte, die C_{org} -, N_t - und P_t -Gehalte sowie über die C/N- und C/P-Verhältnisse von Kiefern-Vergleichsfläche und Erlenparzelle (E_1) (siehe auch Anhang C-0).

7.1.1 pH-Werte

Unter Erle ist die Azidität in der organischen Auflage deutlich gemindert im Vergleich zur Kiefern-Kontrollfläche. Im Mineralboden bis 30 cm Tiefe treten jedoch keine gesicherten Differenzen zwischen den Versuchsgliedern auf. Diese eindeutige Anhebung der pH-Werte in der Auflage regte das Bakterienleben an und ermöglichte eine effiziente Bindung von Luft- N_2 durch die vitalen Weißerlen.

7.1.2 Organischer Kohlenstoff

Der Gehalt an Kohlenstoff in der organischen Auflage der meliorierten Parzelle ist eindeutig reduziert. Im Mineralboden zeichnen sich unter Erle in allen Tiefenstufen höhere Gehalte ab, was wohl auf das Einmischen des früheren Auflagehumus (doppelte Menge!) zurückzuführen ist; wegen der Heterogenität des gepflügten Soluns sind diese Unterschiede jedoch nicht statistisch gesichert.

7.1.3 Gesamt-Stickstoff und C_{org}/N_t -Verhältnisse

Die N-Gehalte auf der Erlenfläche sind sowohl in der Auflage als auch im Mineralboden signifikant höher als die Vergleichswerte unter Kiefer. Für diesen N-Anstieg auf der meliorierten Variante ist ebenfalls das Einpflügen von Auflagehumus, daneben aber auch die N_2 -Bindung der Erlen verantwortlich.

Eine deutliche Verbesserung der C/N-Verhältnisse ist für die Erlenfläche bis zu einer Tiefe von 10 cm zu registrieren. In der Auflage verengte sich das Verhältnis von 37 auf etwa 13. Aus dem biologisch

inaktiven Rohhumus des Kiefernbestandes entwickelte sich unter den wüchsigen Erlen der gekalkten und gepflügten Parzelle F-Mull.

Für die Tiefenstufe 0-10 cm deutet sich übrigens eine Lockerung an. Sie dürfte eine Folge des Vollumbruchs, des Einarbeitens von Rohhumus als auch der biogenen Lockerung sein.

7.1.4 Gesamt-Phosphor und C_{org}/P_t -Verhältnisse

In der Auflage ist der P-Gehalt auf der Erlenfläche signifikant überlegen. Im Mineralboden weichen die P-Gehalte indessen nicht voneinander ab. Deshalb ist auch die Einengung des C/P-Verhältnisses auf die organische Auflage beschränkt. Die leichte Erhöhung des C/P-Quotienten im Mineralboden der Erlenfläche dürfte Folge des Einarbeitens von Rohhumus sein.

7.1.5 Gesamtvorräte an Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor

Die Gesamtvorräte (organische Auflage und Mineralboden bis 30 cm Tiefe) an C, N, P und Ca sind in Tab. 31 zusammengestellt.

Die Gesamtvorräte an Kohlenstoff liegen auf der Erlenvariante um rund 20 % niedriger als unter Kiefer. Diese C-Verluste betreffen nur die organische Auflage; denn im Mineralboden ist eine Vorratsmehrung zu verzeichnen, bedingt durch das Einpflügen der zweifachen Menge von Auflagehumus und Bodenvegetation.

Im Gegensatz zum Kohlenstoff sind die N-Vorräte auf der meliorierten Fläche deutlich erhöht. Ihre Auflage speichert zwar ebenfalls weniger N als jene unter Kiefer, im Mineralboden ist Stickstoff jedoch angereichert. Diese Akkumulation beruht vor allem auf dem Einarbeiten der doppelten organischen Auflage und auf der N_2 -Bindung durch die Erlen.

Die durchweg niedrigeren P-Vorräte auf der meliorierten Erlenparzelle in allen Horizonten deuten auf Heterogenitäten im Phyllitschutt, dem Ausgangsmaterial der Bodenbildung, hin.

Tab. 30: pH-Werte, C_{org} -, N_t -, P_t -Gehalte (mg/g) und die C/N- und C/P-Verhältnisse der Versuchsglieder des Versuchs Archenohe
(Die Buchstaben kennzeichnen die Signifikanzen zwischen den Versuchsgliedern)

Tiefe (cm)		KIEFER	ERLE
pH- H ₂ O	Auflage	3.1a	4.0b
	00-10	3.5a	3.5a
	10-20	3.6a	3.7a
	20-30	3.9a	3.8a
pH- CaCl ₂	Auflage	2.8a	3.7b
	00-10	3.1a	3.3a
	10-20	3.3a	3.4a
	20-30	3.6a	3.5a
C-org.	Auflage	424.4a	285.2b
	00-10	31.0a	41.4a
	10-20	8.9a	22.1a
	20-30	6.3a	17.8a
N _t	Auflage	11.5a	21.7b
	00-10	1.8a	3.5b
	10-20	0.8a	1.2b
	20-30	1.0a	1.3b
C/N	Auflage	36.7a	13.1b
	00-10	17.4a	11.9b
	10-20	11.8a	17.8a
	20-30	6.0a	13.8a
P _t	Auflage	0.6a	0.9b
	00-10	0.4a	0.5a
	10-20	0.5a	0.4a
	20-30	0.5a	0.5a
C/P	Auflage	656.0a	327.1b
	00-10	72.2a	83.2a
	10-20	18.1a	52.5a
	20-30	12.8a	36.4a

Tab. 31: Bioelementvorräte im Oberboden (org. Auflage und Mineralboden 0-30 cm) der Versuchsglieder des Versuchs Archenohe

			KIEFER	ERLE
C	t/ha	org. Aufl.	49.6	7.4
		0-30 cm	39.5	64.0
		Gesamt	89.1	71.4
N	Kg/ha	org. Aufl.	1352	563
		0-30 cm	3155	4621
		Gesamt	4507	5184
P	Kg/ha	org. Aufl.	75	23
		0-30 cm	1302	1150
		Gesamt	1377	1181
Ca	Kg/ha	org. Aufl.	267	118
		0-30 cm	791	2212
		Gesamt	1085	2330

Tab. 32: Ca-, Mg-, K- und Na-Gesamtgehalte (mg/g) der Versuchsglieder des Versuchs Archenohe
(Die Buchstaben kennzeichnen die Signifikanzen zwischen den Versuchsgliedern)

Tiefe (cm)		KIEFER	ERLE
Ca	Auflage	2.3a	4.5b
	00-10	0.3a	1.1b
	10-20	0.3a	0.9a
	20-30	0.3a	0.7b
Mg	Auflage	0.5a	0.7b
	00-10	0.5a	0.6a
	10-20	0.5a	0.6a
	20-30	0.6a	0.6a
K	Auflage	4.6a	8.5a
	00-10	24.6a	22.9a
	10-20	24.7a	25.2a
	20-30	24.9a	25.5a
Na	Auflage	0.8 a	1.3b
	00-10	4.0 a	4.2a
	10-20	4.0 a	4.2a
	20-30	4.4 a	4.3a

7.1.6 Gesamtgehalte und -vorräte an Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium

In Tab. 32 sind die Ca-, Mg-, K- und Na-Gehalte aufgeführt.

Die Ca-Gehalte sind auf der Erlenfläche im Vergleich zur Kiefern-Parzelle deutlich angestiegen. Gesicherte Unterschiede lassen sich in der Regel bis 30 cm Tiefe feststellen. Durch die kräftige Kalkung mit insgesamt 100 dt/ha CaCO_3 wurden die Gesamt-Calciumvorräte auf der Erlenversuchsfläche merklich angehoben (vgl. Tab. 31). 30 Jahre nach Versuchsbeginn sind noch etwa 30 % des gedüngten Calciums im Oberboden nachweisbar.

Signifikant erhöhte Mg-Gehalte unter Erle sind auf die organische Auflage beschränkt. Im Mineralboden deutet sich nur ein leichter Anstieg an, der auf Einarbeitungseffekten beruhen dürfte. Die Gesamt-vorräte an Mg änderten sich durch die Melioration kaum.

Die Gehalte und Vorräte an K und Na wurden durch den Meliorations-eingriff nicht beeinflusst; die K-Ausstattung ist als reichlich zu bezeichnen (vergl. Anhang C-1).

7.1.7 Gesamtgehalte und -vorräte an Mangan, Eisen und Aluminium

Tendenziell besitzt die Erlenvariante etwas niedrigere Gehalte und Vorräte an Mn, Fe und Al, doch sind die Abweichungen gering und nicht gesichert (vergl. Anhang C-1).

7.2 Kationenaustauscheigenschaften

7.2.1 Vergleich zwischen Perkولاتen (1 M NH_4Cl) und Schüttel-extrakten (0,5 M NH_4Cl) zur Bestimmung von austauschbaren Kationen

Für Mn, K, Na, Ca und Mg ergab sich eine befriedigende Übereinstimmung beider Verfahren. Die Werte für die basischen Kationen nach dem Schüttel-extraktverfahren liegen dabei im Trend etwas höher als die Vergleichswerte nach der Perkulationsmethode. Dies gilt auch für den Basensättigungsgrad.

Für Al und Fe ergaben sich dagegen nach der Perkulationsmethode deutlich höhere Werte. Umgekehrt erfaßte das Schüttel-extraktverfahren im Mineralboden mehr Protonen.

7.2.2 Überprüfung der Meliorationswirkungen auf Kationen-austauschkapazität und Basensättigung

Den Tab. 33 und 34 sind die Werte für KAK und Basensättigung zu entnehmen (siehe auch Anhang C-2,3).

Mit zunehmender Profiltiefe sinken die KAK-Werte regelmäßig ab. Beide KAK-Methoden weisen für die meliorierte Erlenparzelle im Mineralboden höhere Austauschkapazitäten für Kationen und auch bis zu einer Tiefe von 30 cm höhere Basensättigungen nach als für den degradierten Boden unter Kiefer; dieser Befund steht in Zusammenhang mit dem etwas angestiegenen pH-Wert und den höheren Humusgehalten.

7.2.3 Überprüfung der Meliorationswirkungen auf die Ionen-sättigungen mit beiden Methoden der KAK-Bestimmung

Die prozentualen Anteile der einzelnen Kationen an der KAK sind in Abb. 17 und Tab. 33 und 34 dargestellt (siehe auch Anhang C-2,3).

Dominierende Kationen sind wiederum nach beiden KAK-Methoden H+Al und Ca mit einem Anteil von 83-96 % (Perkolat) bzw. 85-92 % (Schüttel-extrakt).

Beide Bestimmungsmethoden erfassen auch die Meliorationseffekte in übereinstimmender Weise: Die Al-Sättigung wird in allen Bodenlagen unter Erle deutlich zugunsten des Ca-Anteils zurückgedrängt; dabei wird die höchste Ca-Sättigung (ca. 30 %) in 10-20 cm Tiefe erreicht. Für Mg ist ebenfalls eine leichte Zunahme nachzuweisen. Auf der meliorierten Fläche nimmt Mg 3-4 %, auf der Kontrollparzelle nur 1-2 % der Austauschplätze ein. Mn, K und Na wurden dagegen durch die Meliorationsmaßnahmen kaum beeinflusst und sind überhaupt nur mit geringeren Anteilen vertreten.

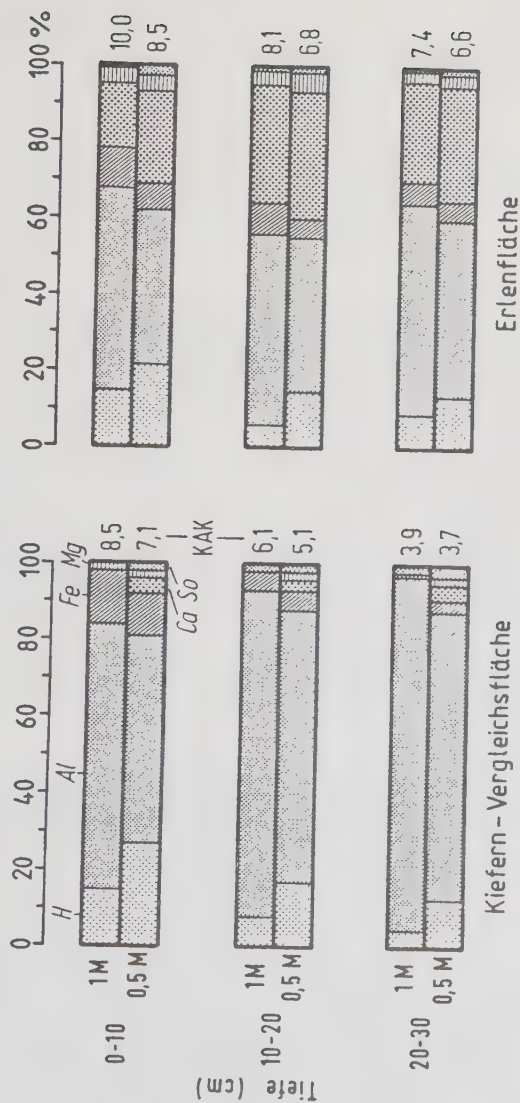
Tab. 33: Prozentuale Anteile von H^+ , Al^{3+} und Ca^{2+} an der KAK_{eff} (1 M NH_4Cl) für die Versuchsglieder nach der Perkolationsmethode (Versuch Archehöhe)

Tiefe (cm)	H(%)		Al(%)		Ca(%)		Ba-Sa(%)		KAK (mmol/lA/100g)	
	KIE	ER	KIE	ER	KIE	ER	KIE	ER	KIE	ER
00-10	14.5	15.2	68.7	53.4	0.0	17.3	2.7	21.8	8.5	10.1
10-20	8.0	6.2	84.8	50.3	0.0	30.7	2.4	35.7	6.1	8.1
20-30	4.5	8.6	91.7	55.4	0.0	25.6	3.7	29.6	5.1	6.8

Tab. 34: Prozentuale Anteile von H^+ , Al^{3+} und Ca^{2+} an der KAK und Basensättigung für die Versuchsglieder nach der Schüttelexttraktmethode (0,5 M NH_4Cl). Versuch Archehöhe

Tiefe (cm)	H(%)		Al(%)		Ca(%)		Ba-Sa(%)		KAK (mmol/lA/100g)	
	KIE	ER	KIE	ER	KIE	ER	KIE	ER	KIE	ER
00-10	26.8	22.4	53.7	40.4	4.4	23.8	8.1	29.0	7.1	8.6
10-20	16.8	15.3	70.8	39.7	3.2	33.4	6.7	39.1	5.1	6.8
20-30	13.3	13.8	75.3	45.7	3.7	30.0	8.1	35.5	3.7	6.6

Abb. 17: Prozentuale Anteile der einzelnen Kationen an der KAK (mmol IÄ/100 g) nach Perkolation (1 M NH_4Cl) und Schüttelextraktion (0,5 M NH_4Cl). Versuch Archenohe



7.2.4 Molverhältnisse von Ca/Al, Ca/H, Mg/Al und Basen/Säure-Verhältnisse (B/S) am Austauscher

Mit beiden Verfahren sind auf der meliorierten Fläche bis 30 cm Tiefe höhere Molverhältnisse von Ca/Al, Ca/H und Mg/Al sowie höhere B/S-Quotienten nachzuweisen als im Boden unter Kiefer (s. Anhang C-2,3).

7.2.5 Vorräte an austauschbaren Kationen im Mineralboden (0-30 cm) nach beiden KAK-Methoden

In Tab. 35 sind die austauschbaren Vorräte nach den beiden KAK-Bestimmungsmethoden aufgeführt.

Nach dem Perkulationsverfahren ergeben sich deutlich höhere Vorräte an Austausch-Al und -Fe als nach dem Schüttelextraktverfahren; mit letzterer Methode bestimmt man dagegen höhere H-Mengen. Na, Ca und Mg werden nach beiden Verfahren in gleicher Weise erfaßt.

Die Melioration führte auf der Erlenfläche zu einer Erhöhung der austauschbaren Vorräte an Ca um das 10fache und an Mg um das 3fache im Vergleich zum Kiefernbestand. Die austauschbaren Vorräte an Al sind nur geringfügig verringert, jene an H^+ und Fe in der Regel sogar leicht angestiegen. Die Na-, K- und Mn-Mengen wurden durch die Boden-sanierung nicht verändert (vergl. Anhang C-2,3).

Tab. 35: Vorräte an austauschbaren Kationen im Mineralboden (0-30 cm) der Versuchsglieder nach beiden KAK-Methoden (in kmol IÄ/ha). Versuch Archenche

	Perkulationsmethode		Schüttelextraktmethode	
	KIEFER	ERLE	KIEFER	ERLE
H	16.3	20.5	28.3	30.3
Al	131.3	110.0	92.0	74.5
Fe	12.6	16.5	10.1	9.8
Ca	0.1	51.5	5.4	51.9
Mg	2.1	7.5	2.3	7.5
Mn	0.1	0.1	0.5	1.2
K	0.4	0.5	1.2	1.2
Na	2.1	1.2	1.8	1.6

7.3 Kennwerte der Bodenlösung

7.3.1 Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der pH-Werte in GBL und WE

In Abb. 18 sind die saisonalen Veränderungen und die Vertikalgradienten der pH-Werte in GBL und WE dargestellt.

In beiden Lösungen nimmt die Azidität im allgemeinen mit zunehmender Bodentiefe ab. Die pH-Werte in der GBL liegen wie bei den anderen Versuchen höher (3,7-5,0) als jene im WE (3,3-4,2) in vergleichbarer Tiefenstufe.

Im Oberboden der Erlenvariante nimmt der pH-Wert in der GBL von April bis Oktober ab, während er unter Kiefer kontinuierlich ansteigt. In 10-30 cm Tiefe dagegen geht die Azidität in der Regel im Juli zurück, um im Oktober von neuem zuzunehmen. Diese zeitlichen Veränderungen sind für die einzelnen Prüfglieder und Tiefenstufen unterschiedlich stark ausgeprägt, nicht immer signifikant und schwer zu interpretieren.

Die Melioration auf der Erlenfläche hat nur in der GBL sowie in 10-30 cm Tiefe einen leichten Anstieg des pH-Wertes im Vergleich zu den Verhältnissen unter Kiefer ausgelöst; in der Reaktion des WE sind keine eindeutigen Unterschiede zwischen den Versuchsgliedern erkennbar.

7.3.2 Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der Aluminium-, Eisen- und Mangan-Konzentrationen in GBL und WE

Die Abb. 19 und 20 stellen die zeitlichen Abläufe und die Vertikalgradienten der Al- und Fe-Konzentrationen dar.

Die Al-Konzentration in GBL und WE nimmt unter Kiefer mit zunehmender Tiefe ab, während auf der meliorierten Fläche keine eindeutigen Verschiebungen auftreten. Die Fe-Konzentration geht gewöhnlich im Unterboden zurück; dies gilt insbesondere für den WE.

Zeitlich gesehen fallen die Al- und Fe-Konzentrationen in der GBL in fast allen Tiefenstufen der meliorierten Parzelle von April bis Oktober; unter Kiefer geht die Fe-Konzentration dagegen im Oberboden

in die Höhe, während die Al-Konzentrationen kaum variieren, und zwar sowohl in der GBL als auch im WE. Die Fe-Konzentrationen des WE variieren in den verschiedenen Bodenlagen ganz verschiedenartig; eine eindeutige, Übereinstimmende Tendenz ist nicht erkennbar.

Was die meliorationsbedingten Veränderungen betrifft, so sind in der GBL der Erlenfläche höhere Al- und Fe-Konzentrationen zu verzeichnen als auf der Kiefer-Vergleichsfläche, und dies besonders deutlich im April und Juli. Im WE dagegen übertreffen die Al-Konzentrationen im Oberboden auf der Vergleichsfläche jene unter Erle, während im Unterboden das Gegenteil der Fall ist. Die Fe-Konzentrationen zeigen keine eindeutige Differenzierung nach Versuchsgliedern, und auch für Mn waren weder zeitliche Veränderungen noch Meliorationseffekte zu erkennen (vergl. Anhang C-4,5).

7.3.3 Zeitliche und vertikale Variation der Calcium-, Magnesium-, Natrium- und Kalium-Konzentrationen in GBL und WE

Die Abb. 19 und 20 zeigen die zeitlichen Verläufe und die Vertikalgradienten der Ca-Konzentrationen in GBL und WE.

Die Ca-Konzentration in der GBL ändert sich mit der Bodentiefe kaum, während sie im WE bis 20 cm Tiefe rapide abnimmt, um in 10-20 cm wieder anzusteigen. Die saisonalen Veränderungen zeigen in der Tendenz für die Kiefernvergleichsfläche und die Ca-Konzentration in der GBL einen kontinuierlichen, für jene im WE einen leichten Anstieg von April bis Oktober. Auf der meliorierten Parzelle variiert Ca im Oberboden über die Zeit kaum, im Unterboden steigt die Ca-Konzentration dagegen im Juli eindeutig an und sinkt danach wieder leicht ab. In beiden Lösungen liegt an allen Untersuchungsterminen auf den meliorierten Flächen ein signifikant höheres Ca-Niveau selbst noch bis zu 30 cm Tiefe vor.

Die Mg-Konzentrationen nehmen in der Regel in beiden Lösungen mit zunehmender Bodentiefe ab. Zeitlich gesehen verändert sich die Mg-Konzentration kaum. Nur im untersten Bodenbereich (20-30 cm) liegt sie im Juli etwas höher als im April. Sowohl die GBL- als auch die WE-Methode weisen erneut für die meliorierte Fläche ein verbessertes Mg-Niveau nach, was darauf hindeutet, daß mit der Kalkung auch Mg zugeführt wurde.

Abb. 18: Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der pH-Werte in der Gleichgewichtsbodenlösung (GBL) und im 2:1-Wasserextrakt (WE); Versuch Archenohe

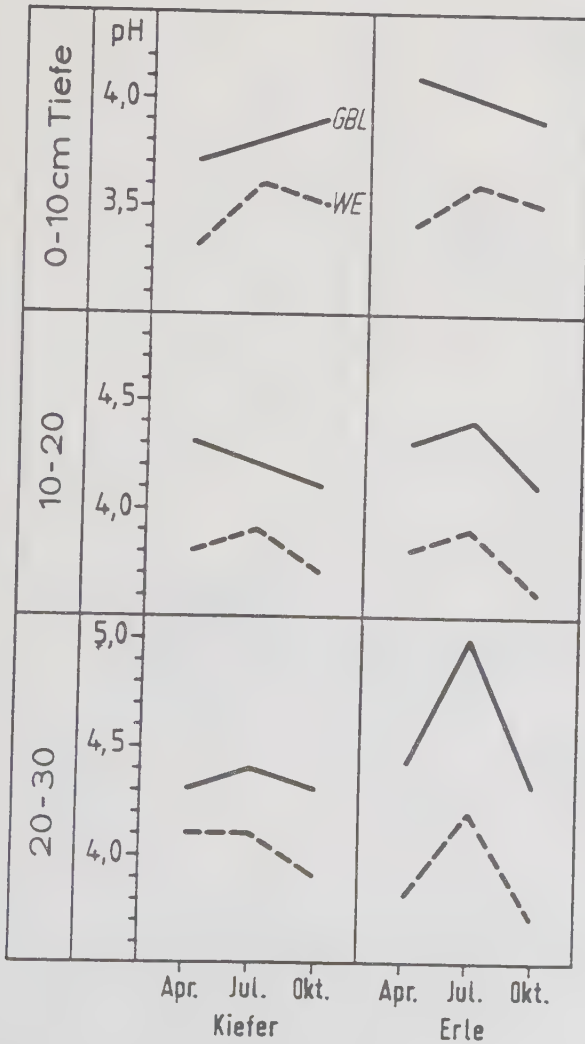


Abb. 19: Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der Aluminium-, Eisen- und Calcium-Konzentrationen (mg/l) in der GEL; Versuch Archenohe

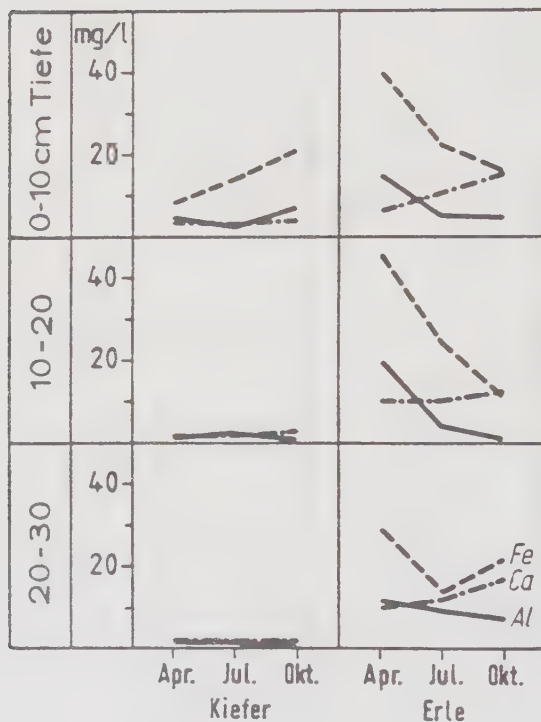
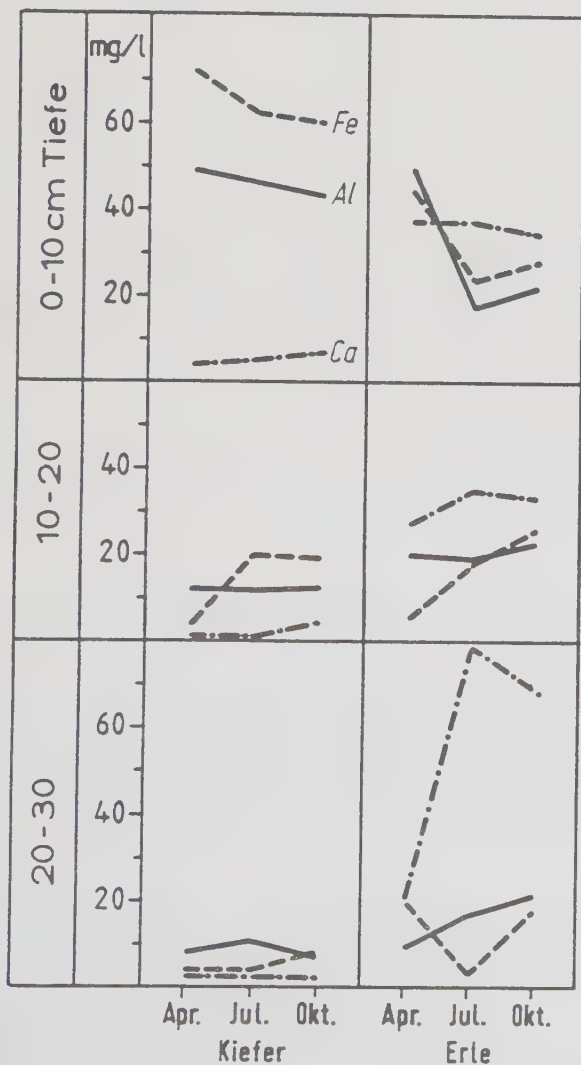


Abb. 20: Vertikalgradient und zeitliche Veränderung der Aluminium-, Eisen- und Calcium-Konzentrationen (mg/l) im WE; Versuch Archenohe



Für K und Na in GBL und WE sind Meliorationseffekte nicht zu beobachten. Ebenso wenig gibt es einen einheitlichen saisonalen oder vertikalen Trend (siehe Anhang C-4,5).

7.3.4 Zeitliche und vertikale Variation der NH_4^+ -N- und NO_3^- -N-Konzentrationen in GBL und WE

Die NH_4^+ -N-Konzentrationen nehmen in GBL und WE im allgemeinen mit zunehmender Bodentiefe deutlich ab. NO_3^- -N weist dagegen weder in der GBL noch im WE einen einheitlichen vertikalen Trend auf. Die NH_4^+ -N-Konzentrationen verändern sich im Zeitablauf nur unwesentlich, doch ist für NO_3^- -N ein starker Anstieg im Oktober zu verzeichnen.

Die NH_4^+ -N-Konzentrationen in der GBL der meliorierten Variante übertreffen an fast allen Entnahmeterminen und in allen Tiefenstufen jene der Kontrollfläche. Im WE treten dagegen erhöhte Konzentrationen nur im Oberboden auf. Die NO_3^- -N-Konzentrationen in der GBL sind im Juli und Oktober, jene im WE nur im Sommer auf der Erlenvariante erhöht. Diese recht deutliche Überlegenheit weist darauf hin, daß unter Erle eine kräftige Nitrifikation abläuft. Vermutlich kommt es auch zu einer Auswaschung von Nitrat, welches dabei hauptsächlich von Ca begleitet wird (vergl. Anhang C-4,5).

7.3.5 Zeitliche und vertikale Variation der Cl^- - und SO_4^{2-} -S-Konzentrationen in GBL und WE

Die Cl^- - und SO_4^{2-} -S-Konzentrationen gehen mit zunehmender Bodentiefe gewöhnlich zurück. Cl^- zeigt weder einen klaren zeitlichen Trend noch Meliorationseffekte. Die SO_4^{2-} -S-Konzentrationen in der GBL sind dagegen an jedem Entnahmetermin auf der meliorierten Variante erhöht (vergl. Anhang C-4,5).

7.3.6 Vergleich der Kationen- und Anionenäquivalentsummen und der prozentualen Anteile der Kationen (SKa in mmol IÄ/l) in der GBL

In Abb. 21 sind die relativen Anteile der einzelnen Kationen an der Kationensumme in der GBL getrennt nach Entnahmetermin und Bodenlage dargestellt (siehe auch Anhang C-7).

Für die SKa ist eine deutliche Tiefenabhängigkeit nur auf der Kiefern-Vergleichsfläche erkennbar. Auf der meliorierten Erlenparzelle, die ein höheres SKa-Niveau aufweist, ändert sich die SKa mit der Bodentiefe kaum. Die gleichen Trends wurden auch für die Summen der Anionen (SAN) beobachtet; allerdings bleibt die SAN in vergleichbaren Horizonten generell hinter der SKa zurück.

Eindeutige zeitliche Schwankungen waren weder für die SKa noch für die SAN nachweisbar.

Auf der Erlenfläche sind Al und Fe an der SKa mit 40-77 % deutlich stärker beteiligt als auf der Kiefernparzelle (20-60 %) (Abb. 21). Dieser Befund dürfte auf einen hohen Anteil komplexierter Ionenspezies hindeuten. Während auf der Kontrollfläche im Unterboden die Al-Anteile allmählich und die Fe-Anteile drastisch absinken, sind beide Elemente in den humusreicheren, tieferen Mineralbodenhorizonten unter Erle an allen Terminen an der SKa noch in beachtlichem Ausmaß beteiligt.

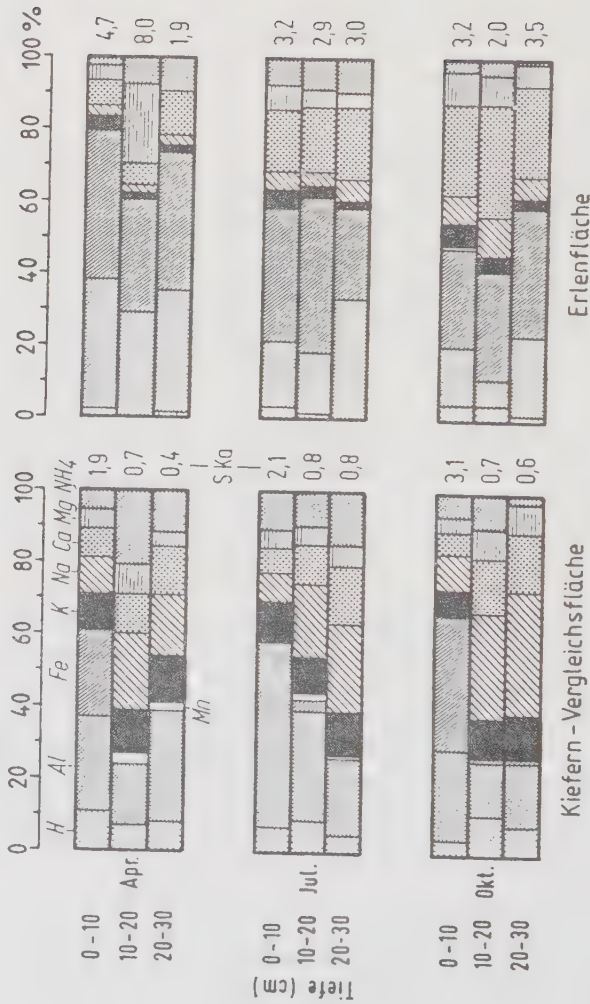
Die Ca-Anteile an der SKa sind im allgemeinen auf der meliorierten Variante ebenfalls höher als unter Kiefer. Auffallend ist auch der sprunghafte Anstieg des Mg-Anteils in der Lage 10-20 cm unter Erle im April, der sich auch im WE der Oberbodenlage findet. Diese Beobachtung weist auf die allgemein hohen Streuungen aufgrund kleinräumiger Heterogenität hin.

Die Anionen Cl und SO_4^{2-} -S sind auf der Kiefern-Vergleichsfläche jeweils mit rund 50 % an der SAN der GBL beteiligt. Zeitliche und vertikale Veränderungen treten kaum auf. Auf der meliorierten Variante hingegen schwanken die Prozentanteile von Cl und SO_4 -S stark, ohne daß ein einheitlicher saisonaler Trend auftritt. Im allgemeinen dominiert unter Erle SO_4 -S im Vergleich zu Cl . Daneben erscheint NO_3 -N hauptsächlich im unteren Bodenbereich an allen Entnahmetermen und erreicht rund 6-21 % Anteil an der SAN.

7.3.7 Vergleich der Kationen- und Anionenäquivalentsummen und der prozentualen Anteile der Kationen (SKa in mmol IÄ/l) im WE

In Abb. 22 sind die Anteile der einzelnen Kationen an der Kationen-summe im 2:1-Wasserextrakt getrennt nach Entnahmetermin und Tiefenstufe aufgetragen (siehe auch Anhang C-7).

Abb. 21: Prozentuale Anteile der einzelnen Kationen an der Kationensumme (SKa in mmol IÄ/l) in der GEL. Versuch Arche Noah



Mit der Bodentiefe nimmt die SKa lediglich auf der Kiefern-Vergleichsfläche deutlich ab. Unter Erle bleibt sie in der Regel über alle Lagen unverändert (außer im April), was auf dem größeren Humusgehalt und der dadurch angestiegenen KAK auch in tieferen Horizonten beruhen dürfte. Ähnliches gilt für die Anionensumme (SAN), die insgesamt hinter der SKa zurückbleibt.

Al und Fe dominieren auf der Kiefern-Vergleichsfläche, Ca und Al stehen auf der meliorierten Parzelle im Vordergrund. Der Al-Anteil verändert sich mit der Profiltiefe kaum, der Fe-Anteil sinkt in der Regel in den tieferen Horizonten, und der Ca-Anteil steigt auf der meliorierten Parzelle im Unterboden deutlich an (16-44 %). Die Melioration spiegelt sich in signifikant erhöhten Ca- und Mg-Anteilen wider, während die durchweg geringe Beteiligung von $\text{NH}_4\text{-N}$, Na und K davon unberührt bleibt.

$\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$ und Cl machen rund 15 bzw. 85 % der SAN aus. Im Unterschied zur GEL ist $\text{NO}_3^{2-}\text{-N}$ im WE auch unter Erle nur in Spuren nachweisbar.

7.3.3 Molverhältnisse von Ca/Al, Ca/H, Mg/Al und Mg/Ca in der GEL und im 2:1-Wasserextrakt

Sowohl in der GEL als auch im WE sind auf der Erlenvariante zu allen Terminen höhere Molverhältnisse von Ca/H und Ca/Al nachzuweisen, und zwar bis zur Tiefe von 30 cm. Der Mg/Al-Quotient ist dagegen unter Erle im Vergleich zur Kiefern-Vergleichsfläche nur im WE angestiegen; in der GEL übertreffen unerwartet die Werte der Kiefernfläche jene der Erlenvariante. Das Mg/Ca-Verhältnis wird durch die Behandlung nicht verschoben; auch sind zeitliche Veränderungen der Mol-Relationen im allgemeinen nicht erkennbar (vergl. Anhang C-6).

7.4 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse aus dem Versuch Archenohé

Dreißig Jahre nach Versuchsanlage war unter Erle der ursprünglich biologisch inaktive Rohhumus in einen F-Mull umgewandelt. Die pH-Werte zeigen eine geminderte Azidität vor allem in der organischen Auflage. Während sich die Gesamtvorräte an organischem Kohlenstoff

im Oberboden auf der Erlenvariante um rund 20 % verringerten, stiegen die Stickstoffvorräte deutlich an, bedingt vor allem durch die Bindung von Luft-N₂ unter einem vitalen Erlenbestand und durch das Aufbringen und Einmischen von Auflagehumus.

Die kräftige Kalkung (100 dz/ha CaCO₃) führte auf der Erlenvariante zu signifikant höheren Gesamt-Ca-Vorräten bis zu einer Tiefe von 30 cm; etwa 30 % des gedüngten Ca sind noch im Boden vorhanden. Die Mg-Gehalte sind nur in der organischen Auflage deutlich angestiegen, die Mg-Vorräte änderten sich kaum. Die Gesamtgehalte und -vorräte an K, Na, Mn, Fe und Al wurden durch die Meliorationsmaßnahmen nicht beeinflusst.

Mit beiden KAK-Bestimmungsmethoden ist ein Rückgang der Al-, Fe- und H-Gehalte und -Sättigungen in der Tiefenstufe 0-10 cm der meliorierten Erlenvariante zu bestimmen. Außerdem weisen beide Verfahren eine Zunahme der Ca-Sättigung und -Gehalte bis 30 cm Tiefe nach. Für Mg ist ebenfalls ein geringer Anstieg der Gehalte in der organischen Auflage erkennbar. K, Mn und Na blieben von den Meliorationseingriffen praktisch unbeeinflusst. Die Gehalte von Mn, K, Na, Ca und Mg werden durch beide KAK-Methoden in ähnlicher Weise erfaßt; der Basensättigungsgrad dagegen ist gewöhnlich nach dem Schüttelextraktverfahren höher als nach der Perkolationmethode, weil die Perkolation für Fe und Al meist höhere Gehalte (dafür aber geringere H-Gehalte) nachweist als die Schüttelextraktion.

In GBL und WE gibt es eine beträchtliche zeitliche Variation der Kationen- und Anionen-Konzentrationen. Hinzu kommt, daß diese temporären Schwankungen auf den einzelnen Versuchsvarianten z. T. gegenläufig sind und daß die Konzentrationen auch durch die räumliche Heterogenität bestimmt werden. Dadurch ist die Interpretation erschwert.

Was die meliorationsbedingten Unterschiede betrifft, so sind in der GBL Al und Fe auf der meliorierten Fläche wie in anderen Versuchen stärker vertreten als auf der Kiefern-Vergleichsfläche. Im WE dagegen treten beide Ionen unter Erle zurück. Nach beiden Verfahren sind jedoch übereinstimmend für die Erlenvariante höhere Ca-Konzentrationen selbst noch in 30 cm Tiefe und an allen Entnahmetermen nachzuweisen. Mg ist dagegen lediglich in den obersten 20 cm erhöht. Auch NO₃²⁻-N

und SO_4^{2-} -S sind in der GBL des Prüfglieds "Erle" stärker vertreten, vermutlich als Folge verstärkter Mineralisation und Nitrifikation. Die Melioration hat schließlich auch zu einem deutlichen Anstieg der Ca/Al- und Ca/H-Molverhältnisse geführt.

Damit spiegeln sich die Meliorationseingriffe auch noch 30 Jahre nach Anlage des Versuchs in den Gesamtbeständen einzelner Nährstoffe sowie in bestimmten Kennwerten der KAK und der Bodenlösung deutlich wider. Alle beobachteten Veränderungen sprechen für eine erhebliche Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit.

8. Bodenchemische Auswertung des Versuchs Großdick

8.1 Kennwerte der Bodenfestphase

Die Abbildungen 23 bis 26 informieren über die pH-CaCl_2 -Werte, die C_{org} - und N -Gehalte sowie die C/N-Verhältnisse der Versuchsglieder. Weitere Angaben befinden sich im Anhang unter D-O.

Die Kiefern-Vergleichsfläche besitzt erwartungsgemäß das höchste Auflagegewicht (VK 12 %) und die MW3-Fläche die höchste Streuung (VK 44 %). Diese beiden Varianten unterscheiden sich nicht signifikant voneinander. Bei den Meliorationsvarianten MW4 und Bi treten die geringsten Auflagegewichte (VK jeweils 40 %) auf. Beide Prüfglieder, die untereinander fast übereinstimmen, weichen von den Varianten MW3 und Ki deutlich ab. Auf den Varianten MW3, MW4 und Bi haben sich die Humusformen unter dem Einfluß der Melioration merklich verbessert.

Für die Feinerderaumgewichte (FERG) des Mineralbodens sind keine signifikanten Unterschiede zu erkennen. Der niedrigste FERG-Wert wurde für die Bodentiefen 0-10 und 10-20 cm der MW3-Variante festgestellt, die höchste Streuung fand sich in 10-30 cm Tiefe derselben Parzelle. Die Bi-Variante weist im gesamten Profil die geringste Streuung des FERG auf.

Was den prozentualen Skelettanteil betrifft, so liegt die Bi-Variante an der Spitze. Ki und MW3 haben ähnliche Steingehalte, und die MW4-Variante ist am steinärmsten. Signifikante Differenzen wurden für die Tiefenstufen 0-10 und 20-30 cm nachgewiesen.

8.1.1 pH-Werte

Die pH-Werte in CaCl_2 der Versuchsglieder sind aus Abb. 23 zu ersehen. Die pH-Werte liegen in der organischen Auflage der Meliorationsvarianten durchweg über den Vergleichswerten der Kiefern-Kontrollflächen. Dabei sind für die Versuchsglieder MW4 und Bi ähnliche Werte nachzuweisen, während MW3 etwas zurückbleibt.

Im Mineralboden steigt der pH-Wert mit zunehmender Bodentiefe in der

Regel an. Für die Profilstufe 0-10 cm ist auf allen meliorierten Flächen eine deutliche Minderung der Azidität erkennbar. Die Bi- und MW3-Variante, die vermutlich ähnliche Kalkmengen erhielten, stimmen in dieser Tiefenstufe gut überein. Die pH-Werte der MW4-Variante sind dagegen nicht nur im Oberboden (wie MW3 und Bi), sondern sogar bis 30 cm Tiefe erhöht; wahrscheinlich hat eine höhere Kalkmenge oder eine Düngung mit Teichschlamm diese Tiefenwirkung verursacht.

8.1.2 Organischer Kohlenstoff

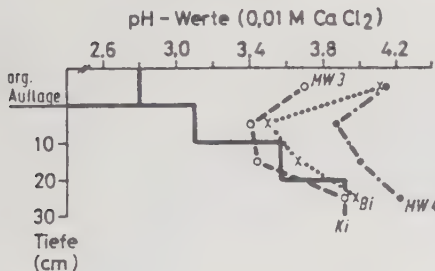
Bei allen Meliorationsvarianten gingen die Gehalte an organischem Kohlenstoff in der organischen Auflage signifikant zurück (Abb. 24). Diese C-Abnahme erklärt sich vor allem durch die Vermischung mit dem Mineralboden als Folge flacher Bodenbearbeitung. Dem Rückgang in der Auflage steht eine Zunahme im Mineralboden gegenüber. Gesichert höhere C-Gehalte treten bei allen Meliorationsvarianten in den obersten 10 cm auf. Für den C-Anstieg im Mineralboden sind neben der Bearbeitung auch eine verstärkte Bioturbation sowie die Neubildung von Wurzelmasse durch Edellaubhölzer, Gräser und Kräuter verantwortlich. Eine Zufuhr von Teichschlamm ist ebenfalls wahrscheinlich.

8.1.3 Gesamt-Stickstoff und C_{org}/N_t -Verhältnisse

Beide Mischwald-Meliorationsvarianten weisen in der organischen Auflage ähnliche N-Gehalte auf wie die Kiefern-Vergleichsflächen (Abb. 25). Sie besitzen lediglich tendenziell ein etwas höheres Niveau. Unter Birke ist dagegen der Auflagehumus eindeutig N-reicher als auf der Kontrollvariante.

Im Mineralboden sinken die N-Gehalte mit zunehmender Bodentiefe; in 30 cm liegen die Tiefenfunktionen aller Varianten dicht beieinander. Gesichert höhere N-Gehalte sind für die Meliorationsvarianten bis 20 cm Tiefe zu verzeichnen. Sie dürften das Ergebnis einer Zufuhr von Teichschlamm, des Einmischens von Auflagehumus sowie der Wirkung von Lupine, verschiedenen Gräsern und Kräutern sein.

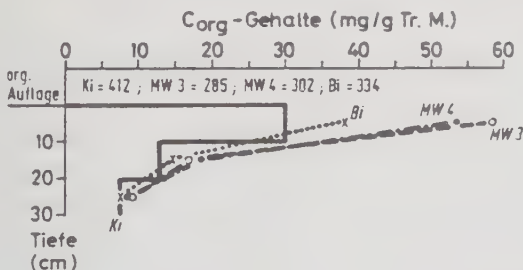
Abb. 23: pH-Werte der Versuchsglieder im Experiment Großdick
(Prüfglieder mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant)



Statistische Sicherung

F-Test	Ki	MW3	MW4	Bi
***	a	b	c	c
***	a	b	c	b
**	a	ab	b	b
***	a	a	b	a

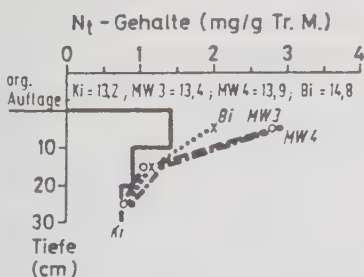
Abb. 24: Gehalte an organischem Kohlenstoff der Versuchsglieder im Experiment Großdick (id. Leg. Abb. 23)



Statistische Sicherung

F-Test	Ki	MW3	MW4	Bi
***	a	b	b	b
**	a	b	b	ab
n. s.	a	a	a	a
n. s.	a	a	a	a

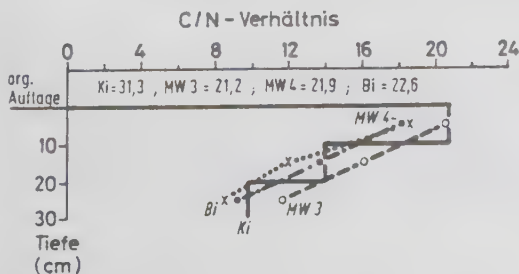
Abb. 25: Gehalte an Gesamtstickstoff der Versuchsglieder im Experiment Großdick (id. Leg. Abb. 23)



Statistische Sicherung

F-Test	Ki	MW3	MW4	Bi
**	a	ab	ab	b
***	a	b	b	c
*	a	ab	b	b
n. s.	a	a	a	a

Abb. 26: C/N-Verhältnis der Versuchsglieder im Experiment Großdick (id. Leg. Abb. 23)



Statistische Sicherung

F-Test	Ki	MW3	MW4	Bi
***	a	b	b	b
n. s.	a	a	a	a
n. s.	a	a	a	a
n. s.	a	a	a	a

Für die C/N-Verhältnisse ist eine Einengung auf Werte um 22 (Kiefer ca. 31) in der organischen Auflage (Abb. 26) nachweisbar. Im Mineralboden treten zwischen den Prüfgliedern jedoch keine Unterschiede im C/N-Verhältnis auf. Aus einer typischen Rohhumusform entwickelte sich auf der MW3-Variante mullartiger Moder bis Moder, auf der MW4-Versuchsfläche Mull bis typischer Moder und auf der Bi-Variante F-Mull bis typischer Moder.

8.1.4 Gesamt-Phosphor und C_{org}/P_t -Verhältnisse

Die Gesamtgehalte an Phosphor in der organischen Auflage liegen auf den meliorierten Flächen deutlich über den Vergleichswerten für die Kiefernparzellen (Abb. 27).

Im Mineralboden sinken die P-Gehalte regelmäßig mit zunehmender Bodentiefe. Ein nachhaltiger Einfluß der vermuteten Phosphordüngung ist für die Versuchsglieder MW4 und Bi lediglich bis 10 cm Tiefe nachweisbar, auf der MW3-Variante reicht er bis 30 cm. Erklärt wird der besonders deutliche Anstieg für MW3 mit einer vermutlich höheren Phosphatgabe bei Versuchsbeginn. Die gleichzeitig mit der Phosphatdüngung verabreichten kräftigen Kalkgaben zum Auflagehumus haben außerdem die Mobilität des Phosphats wahrscheinlich herabgesetzt, denn die höhere Calcium-Aktivität mindert die Löslichkeit des Calcium-Düngephosphats.

Das C/P-Verhältnis ist auf den meliorierten Parzellen nur in der organischen Auflage von etwa 590 (Kiefer) auf etwa 290 zurückgegangen.

8.1.5 Gesamtvorräte an Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor

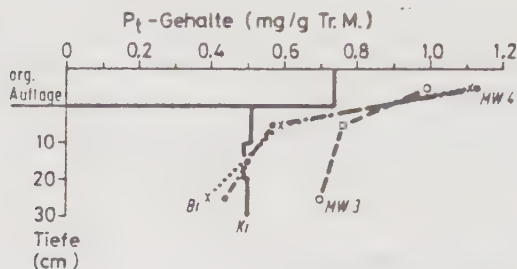
Die Gesamtvorräte an C_{org} , N und P sowie die Veränderungen durch die Meliorationseingriffe sind in Tab. 36 zusammengefaßt.

Bei allen Meliorationsvarianten sind die C-Mengen in der organischen Auflage eindeutig reduziert, vor allem auf der MW4- und Bi-Fläche. Allerdings erfolgte eine erhebliche Umverteilung aus der organischen Auflage in den Mineralboden hinein (vor allem in 0-10 cm Tiefe). In den Lagen 10-30 cm unterscheiden sich die C-Vorräte nicht signifikant.

Tab. 36: Vorräte an organischem Kohlenstoff, Gesamtstickstoff und Gesamtphosphor im Oberboden (org. Auflage und Mineralboden 0-30 cm) und ihre Veränderungen durch die Melioration. Experiment Großdick

Boden-Kom- partiment	Org. Kohlenstoff (t/ha)				Stickstoff (kg/ha)				Phosphor (kg/ha)			
	Versuchsglied				Versuchsglied				Versuchsglied			
	KI	MW3	MW4	BI	KI	MW3	MW4	BI	KI	MW3	MW4	BI
org. Aufl.	37.7	20.3	11.7	12.1	1199	963	538	534	67	70	44	39
0-30cm	34.6	46.4	40.4	37.2	2328	2704	3404	2165	1152	1406	1134	1010
Gesamt	72.3	66.7	52.1	49.3	3447	3667	3942	3185	1219	1476	1178	1049
Abw. von Kiefern-ver- gleichsfläche		-5.6	-20.2	-23.0		+220	+495	-262		+257	-41	-170
%-Veränderung gegenüber Kiefern- vergleichs- fläche		-7.7	-27.9	-31.8		+5.9	+12.6	-7.6		+17.4	-3.3	-13.9

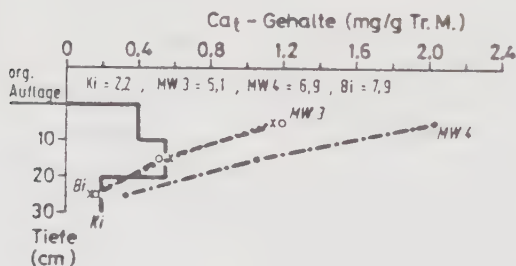
Abb. 27: Gesamt-Phosphorgehalte der Versuchsglieder im Experiment Großdick (id. Leg. Abb. 23)



Statistische Sicherung

F-Test	Ki	MW3	MW4	Bi
***	a	b	b	b
***	a	b	ac	c
***	a	b	a	a
***	a	b	ac	c

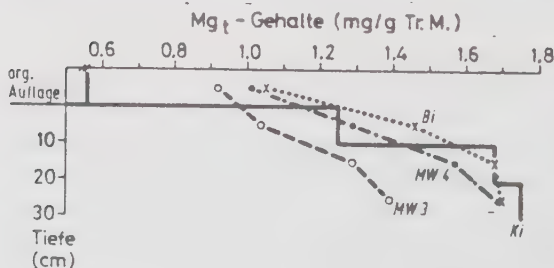
Abb. 28: Gesamt-Calciumgehalte der Versuchsglieder im Experiment Großdick (id. Leg. Abb. 23)



Statistische Sicherung

F-Test	Ki	MW3	MW4	Bi
***	a	b	c	c
***	a	ab	b	b
n. s.	a	a	a	a
n. s.	a	a	a	a

Abb. 29: Gesamt-Magnesiumgehalte der Versuchsglieder im Experiment Großdick (id. Leg. Abb. 23)



Statistische Sicherung

F-Test	Ki	MW3	MW4	Bi
***	a	b	b	b
***	a	b	ac	c
***	a	b	a	a
*	a	b	ab	a

Insgesamt liegen auf den Meliorationsvarianten MW3 und MW4 bzw. Bi geringere C-Vorräte von rund 6 bzw. 20-23 t/ha (= 8 bzw. 28-32 %) vor.

Die Stickstoffvorräte liegen in der organischen Auflage der Versuchsglieder MW4 und Bi signifikant niedriger, bedingt durch das Einarbeiten des O-Horizonts in den mineralischen Oberboden. Deshalb war Stickstoff nach Melioration in den obersten 10 cm des Mineralbodens durchweg, auf den MW4- und Bi-Flächen auch noch in 10-20 cm Tiefe signifikant angereichert. Insgesamt liegen die Stickstoffvorräte der Mischwaldflächen gegenüber den Kiefernflächen um rund 6 bzw. 13 % höher. Bei der Bi-Variante dagegen traten vermutlich N-Verluste von rund 260 kg/ha oder 8 % ggr. dem angenommenen Ausgangskapital auf.

Für die MW4- und die Bi-Variante ist eine Unterlegenheit bezüglich der P-Vorräte in der organischen Auflage, für die MW3-Fläche in der Lage 20-30 cm eine P-Anreicherung zu beobachten. Bei letzterer Variante deuten sich außerdem als Trend höhere P-Vorräte im ganzen Profil an. Insgesamt sind die P-Vorräte auf den Versuchsgliedern MW4 und Bi um rund 3 bzw. 14 % des vermutlichen Ausgangskapitals reduziert. Für die Fläche MW3 ergab sich dagegen ein Vorratsanstieg (17 %) im Mineralboden bedingt durch das Einmischen von Auflagehumus und Bodenvegetation und durch eine (wahrscheinlich kräftige) P-Düngung.

8.1.6 Gesamtgehalte und -vorräte an Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium

Abb. 28 und 29 informieren über die Tiefenfunktionen von Ca und Mg. Tab. 37 enthält die Gesamt-vorräte an Ca, Mg und K im Oberboden (org. Auflage und Mineralboden 0-30 cm) der Versuchsglieder (s. Anh. D-1).

Die Ca_t -Gehalte sind in der organischen Auflage aller Meliorationsflächen deutlich gegenüber der Vergleichsvariante angestiegen (Abb. 28). Im Mineralboden gehen die Ca-Gehalte bei den meliorierten Versuchsgliedern mit zunehmender Bodentiefe merklich zurück. Signifikante meliorationsbedingte Erhöhungen sind lediglich in der Bodentiefe 0-10 cm nachzuweisen. Im unteren Mineralbodenbereich (10-30 cm) treten keine gesicherten Differenzen zwischen den Varianten auf. Es deutet sich jedoch ein höheres Gehaltsniveau für die MW4-Variante an; deren Gesamt-vorräte an Ca stiegen in der organischen Auflage und in

0-10 cm Tiefe gegenüber den übrigen Varianten signifikant an. Die Prüfglieder MW3 und Bi zeigen zwar ebenfalls einen deutlichen Trend zur besseren Ausstattung mit Ca, doch sind die Abweichungen von der Kontrolle nicht gesichert.

Insgesamt liegen die Ca-Vorräte auf der MW4-Variante um rund 55 %, auf der MW3- und Bi-Variante um rund 26 bzw. 29 % über den Vergleichswerten der Kontrollflächen. Die klare Überlegenheit der MW4-Variante im Vergleich zu MW3 und Bi (die beide ähnliche Ca-Vorräte aufweisen) ist ein weiterer Beleg für die vermutete höhere Kalkgabe zu Beginn des Experiments.

Die Mg-Gehalte in der organischen Auflage sind bei allen Meliorationsvarianten, jene in den obersten 10 cm des Mineralbodens nur auf den Bi-Flächen signifikant erhöht (Abb. 29), was auf Düngung hindeutet. Auffallend sind die niedrigen Mg-Gehalte im Mineralboden des Prüfglieds MW3. Die Mg-Vorräte unterscheiden sich nicht signifikant. Tendenziell sind allerdings auf Versuchsglied MW3 im Mineralboden besonders geringe Vorräte vorhanden, was auf a priori-Unterschieden in der ursprünglichen Mg-Ausstattung sowie auf Lockerung und Einarbeiten von Mg-armer Auflage beruhen dürfte.

Die Gesamtgehalte an Kalium sind nach Melioration lediglich in der organischen Auflage signifikant angestiegen; dieser Befund beruht wohl in erster Linie auf der Vermischung mit Mineralboden. Die Gesamt-vorräte an K in der organischen Auflage und in den einzelnen Mineralbodenhorizonten unterscheiden sich nicht signifikant. Bezüglich der Vorräte schneiden jedoch die MW3- und die Bi-Variante ungünstiger ab als Prüfglied MW4.

Die Na-Gehalte wurden durch die Melioration nur in der organischen Auflage signifikant verändert. Der dadurch bewirkte Anstieg dürfte hauptsächlich auf Einmischung von Mineralboden durch Bodenbearbeitung und erhöhter Bioturbation beruhen. Anzumerken ist, daß die Mischwaldvarianten in den obersten 20 cm des Mineralbodens einen geringeren Na-Gehalt aufweisen als die übrigen Prüfglieder. Die Gesamt-vorräte variieren ohne bedeutende Differenzen auf ähnlichem Niveau.

Tab. 37: Vorräte an Gesamtkalium, Gesamtmagnesium und Gesamtkalium im Oberboden (org. Auflage und Mineralboden 0-30 cm) und ihre Veränderungen durch die Melioration. Experiment Großdick

Boden-Kom- partiment	Calcium (kg/ha)				Magnesium (kg/ha)				Kalium (kg/ha)			
	Versuchsglied				Versuchsglied				Versuchsglied			
	KI	MW3	MW4	BI	KI	MW3	MW4	BI	KI	MW3	MW4	BI
org. Aufl.	198	344	271	282	50	65	40	37	220	693	380	288
0-30cm	853	1076	2159	1199	3676	2504	3552	3443	62749	51753	70145	40183
Gesamt	1051	1420	2430	1481	3726	2569	3592	3470	62969	52446	70525	40471
Abweich. von Kiefern-ver- gleichsfläche		+369	+1379	+430		-1157	-134	-256		-10523	+7556	-22498
%-Veränderung gegenüber Kiefern- vergleichs- fläche		+35.1	+131.2	+10.9		-31.0	-3.5	-6.8		-16.7	+10.7	-35.7

8.1.7 Gesamtgehalte und -vorräte an Mangan, Eisen und Aluminium

Die Gehalte an Al, Fe und Mn wurden durch die Melioration vor allem in der organischen Auflage beeinflusst. Der beobachtete Anstieg dürfte vor allem auf verstärkter Einmischung von Mineralboden beruhen (vergl. Anhang D-1).

In den Gesamtvorrräten vergleichbarer Horizonte unterscheiden sich die verschiedenen Prüfglieder nicht signifikant voneinander.

8.2 Kationenaustauscheigenschaften

8.2.1 Vergleich zwischen Perkolaten (1 M NH_4Cl) und Schüttel-extrakten (0,5 M NH_4Cl) zur Bestimmung von austauschbaren Kationen

Die KAK-Werte und Ionensättigungen sind in Tab. 38 und 39 und Abb. 30 zusammengestellt (siehe auch Anhang D-2).

Die Gehalte von Ca und Mg nach beiden Methoden stimmen ungefähr überein. Sie werden mit der Perkulationsmethode in der organischen Auflage etwas höher eingeschätzt als mit dem Schüttelextraktverfahren. Die letztere Methode weist dafür gewöhnlich mehr K und Na nach.

Die Al-, Fe- und Mn-Gehalte sind in den Perkolaten eindeutig höher als im Schüttelextrakt; dafür bleiben die H-Gehalte zurück.

Das Perkulationsverfahren liefert in der Regel für die organische Auflage und den Mineralboden 0-10 cm etwas höhere KAK-Werte als die Schüttelextraktmethode und gleichzeitig überlegene Al-Sättigungen. Für die Basensättigung ergeben sich dagegen nach beiden Verfahren übereinstimmende Werte.

8.2.2 Überprüfung der Meliorationswirkungen auf Kationenaustauschkapazität und Basensättigung

Die KAK- sowie die Basensättigungswerte sind getrennt nach Bestimmungsmethoden und Versuchsgliedern in den Tab. 38 und 39 zusammengestellt (siehe auch Anhang D-3,4,5).

Die KAK nimmt mit zunehmender Bodentiefe deutlich ab, und zwar in dem Maße, in dem auch die Humusgehalte zurückgehen. Eine klare Erhöhung der KAK ist auf den meliorierten Flächen für die organische Auflage und die obersten 10 cm des Mineralbodens mit beiden Methoden nachweisbar. Dieser Anstieg beruht auf der Zunahme der negativen Ladung bei höheren pH-Werten.

Eine eindeutige Verbesserung der Basensättigung nach Melioration reicht sogar bis 30 cm Tiefe. Die Varianten MW3 und Bi besitzen in vergleichbaren Lagen ähnliche Basenanteile, während der Basensättigungsgrad auf der Fläche MW4 als Folge der vermuteten stärkeren Kalkung im Mineralboden durchweg überlegen ist.

8.2.3 Überprüfung der Meliorationswirkungen auf die Ionensättigungen mit beiden Methoden der KAK-Bestimmung

Die prozentualen Anteile der Kationen nach beiden KAK-Methoden sind in Abb. 30 und Tab. 38 und 39 dargestellt (siehe auch Anh. D-3,4,5).

H, Al und Ca nehmen wie bei den anderen Experimenten an der KAK_{eff} (75-91 %) bzw. KAK_{ex} (79-93 %) den höchsten Anteil ein.

Beide Verfahren weisen eine meliorationsbedingte Verminderung der H-, Al- und Fe-Sättigung in der organischen Auflage und in der Bodentiefe 0-10 cm nach; dieser Rückgang reicht bei der Variante MW4 sogar bis 30 cm Tiefe.

Wiederum ist festzustellen, daß insbesondere Al und Ca um die Austauschplätze konkurrieren. Die Ca-Sättigung in der organischen Auflage und bis zu einer Tiefe von 30 cm stieg nach Melioration beträchtlich an. Auf der MW4-Variante erreicht Ca in der Lage 20-30 cm noch immer eine Sättigung von rund 40 %. Ähnliches gilt für die MW3- und die Bi-Variante, bei denen jedoch insgesamt die Ca-Sättigung hinter dem Niveau von Versuchsglied MW4 zurückbleibt.

Alle Meliorationsvarianten zeigen im Vergleich zur Kiefernvariante in der organischen Auflage und in 0-10 cm Tiefe auch eine erhöhte Mg-Sättigung an den Austauschern; in den tieferen Horizonten ist dagegen der Anteil von Mg an der KAK nicht entscheidend verbessert.

Tab. 38: Prozentuale Anteile von H^+ , Al^{3+} und Ca^{2+} an der KAK_{eff} und Basensättigung für die Versuchsglieder nach der Perkolationsmethode (1 M NH_4Cl).
Experiment Grolldick

Tiefe (cm)	H(%)				Al(%)				Ca(%)			
	KI	MW3	MW4	BI	KI	MW3	MW4	BI	KI	MW3	MW4	BI
Auflage	25.2	4.3	1.0	0.9	30.1	8.0	3.3	2.5	30.0	73.3	79.7	74.0
00-10	15.7	7.8	0.3	8.0	55.8	38.2	20.4	36.2	3.5	31.8	62.8	36.0
10-20	4.3	5.8	2.4	5.6	78.2	59.1	29.9	65.6	3.8	15.8	55.5	14.6
20-30	1.5	3.1	1.7	2.4	85.0	72.4	49.2	79.3	4.6	11.7	40.3	8.5

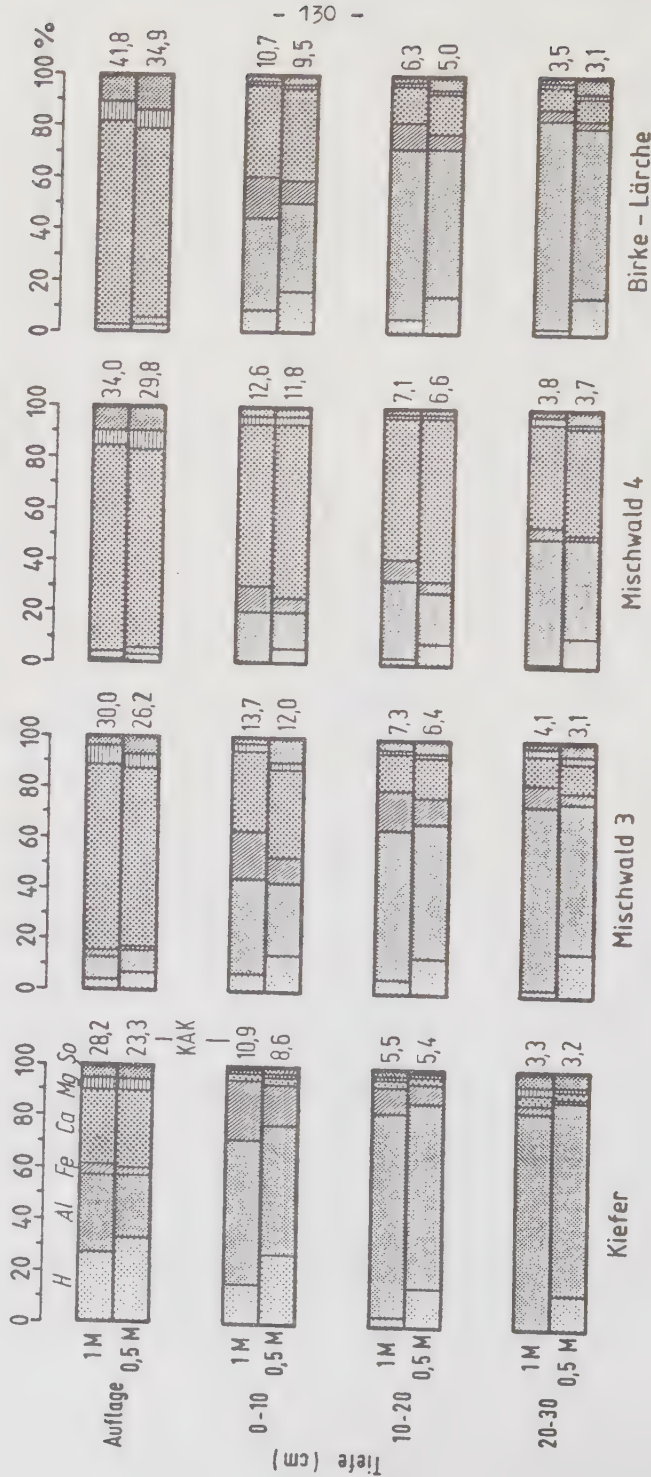
Tiefe (cm)	Basensättigung(%)				KAK(mmol/Ä/100g)			
	KI	MW3	MW4	BI	KI	MW3	MW4	BI
Auflage	36.1	82.6	90.0	83.6	28.7	30.0	34.0	41.8
00-10	4.7	34.6	66.4	38.8	10.9	13.7	12.6	10.7
10-20	5.6	18.2	57.8	17.0	5.5	7.3	7.1	6.3
20-30	7.3	15.2	42.9	11.3	3.3	4.1	3.8	3.5

Tab. 39: Prozentuale Anteile von H^+ , Al^{3+} und Ca^{2+} an der KAK_{ex} und Basensättigung für die Versuchsglieder nach der Schütte, extraktmethode (0,5 M NH_4Cl). Experiment Großdick

Tiefe (cm)	H(%)				AL(%)				CA(%)			
	KI	MW3	MW4	BI	KI	MW3	MW4	BI	KI	MW3	MW4	BI
Auflage	32.5	7.2	2.8	2.3	23.8	8.5	3.1	3.3	30.6	69.9	76.8	73.5
00-10	27.5	15.2	5.9	15.9	50.3	29.0	14.1	33.8	3.5	34.8	66.6	37.0
10-20	15.4	16.0	8.2	14.5	71.5	52.7	20.1	56.8	2.5	17.0	62.4	16.8
20-30	13.7	17.3	11.8	14.5	74.1	58.1	39.1	65.1	3.0	12.2	41.7	8.7

Tiefe (cm)	Basensättigung(%)				KAK(mmol/lä/100g)			
	KI	MW3	MW4	BI	KI	MW3	MW4	BI
Auflage	39.2	80.3	88.6	84.1	23.3	26.2	29.8	34.9
00-10	5.6	38.6	71.4	40.0	8.6	12.0	11.8	9.5
10-20	5.4	20.8	66.0	20.6	5.4	6.4	6.6	5.0
20-30	8.0	19.2	46.1	15.1	3.2	3.1	3.7	3.1

Abb. 30: Prozentuale Anteile der einzelnen Kationen an der KAK (mmol IÄ/100 g) nach Perkolatation
(1 M NH_4Cl) und Schüttelextraktion (0,5 M NH_4Cl). Versuch Großdick



8.2.4 Molverhältnisse von Ca/Al, Ca/H, Mg/Al und Basen/Säure-Verhältnisse (B/S) am Austauscher

Die positive Wirkung der Meliorationsmaßnahmen spiegelt sich auch in den Molverhältnissen von Ca/Al, Ca/H, Mg/Al und B/S bis etwa 20 cm Tiefe wider. Diese Quotienten schwanken für die Prüfglieder MW3 und Bi auf ähnlichem Niveau. Demgegenüber erreicht die MW4-Variante bis zu einer Tiefe von 30 cm deutlich höhere Werte (vergl. Anh.D-3,4).

8.2.5 Vorräte an austauschbaren Kationen in organischer Auflage und Mineralboden (0-30 cm) nach beiden KAK-Methoden

In Tab. 40 sind die Vorräte an austauschbaren Kationen nach beiden KAK-Methoden zusammengefaßt.

Mit beiden Verfahren lassen sich für Ca Meliorationseffekte in der organischen Auflage sowie im Mineralboden bis 30 cm Tiefe nachweisen; dies gilt insbesondere für Prüfglied MW4. Auch die Mg-Vorräte nahmen in den Böden aller Meliorationsvarianten bis mindestens 10 cm Tiefe zu. Die Ausstattung mit austauschbarem Na und K wurde indessen durch die Meliorationseingriffe nicht verändert. Während die Mn-Mengen hauptsächlich in der organischen Auflage und in den obersten 10 cm des Mineralbodens vermutlich als Folge der Zufuhr mit dem Streufall bei verringerter Mobilität (höherer pH-Wert) anstiegen, wurden die H- und Al-Vorräte auf den meliorierten Flächen im Oberboden herabgesetzt. Die Fe-Mengen gingen dagegen nur in der organischen Auflage zurück.

8.3 Kennwerte der Bodenlösung (Entnahmetermin Oktober)

8.3.1 Vertikalgradient und meliorationsbedingte Veränderung der pH-Werte sowie der Al-, Fe und Ca-Konzentrationen

In Tab. 41 sind die pH-Werte sowie die Al-, Fe- und Ca-Konzentrationen (mg/l) in GBL und WE für drei Versuchsglieder und den Entnahmetermin Oktober angegeben.

In beiden Lösungen ist eine Minderung der Bodenazidität mit zunehmen-

Tab. 40: Vorräte an austauschbaren Kationen in organischer Auflage und Mineralboden (0-30 cm) der Versuchsglieder nach beiden KAK-Methoden (in kmol IÄ/ha). Experiment Großdick

		Perkolationsmethode				Schüttelextraktmethode			
		KI	MW3	MW4	BI	KI	MW3	MW4	BI
H	org. Aufl.	7.0	0.9	0.1	0.1	6.9	1.4	0.3	0.3
	0-30 cm	12.3	1.4	2.1	8.0	24.5	21.0	12.4	17.3
	Gesamt	19.3	10.3	2.2	8.1	31.4	22.4	12.7	17.6
Al	org. Aufl.	7.7	1.7	0.4	0.4	5.0	1.6	0.4	0.4
	0-30 cm	99.5	80.3	48.4	75.1	79.9	58.0	33.2	12.3
	Gesamt	107.5	82.0	49.3	75.5	84.9	59.6	33.6	12.7
Fe	org. Aufl.	1.2	0.4	0.1	0.1	0.7	0.3	0.1	0.6
	0-30 cm	20.9	24.6	13.9	14.9	11.7	12.2	12.2	7.7
	Gesamt	22.1	25.0	14.0	15.0	12.4	12.5	12.3	8.3
Ca	org. Aufl.	7.7	15.8	10.5	11.4	6.6	3.2	8.9	9.5
	0-30 cm	5.1	33.9	92.0	30.7	3.6	31.8	93.0	27.7
	Gesamt	12.8	49.7	102.5	42.1	10.2	35.0	101.9	37.2
Mg	org. Aufl.	0.9	1.4	0.9	0.9	0.9	1.2	0.8	0.8
	0-30 cm	1.8	3.4	3.9	2.1	1.5	3.0	4.0	2.0
	Gesamt	2.7	4.8	4.8	3.0	2.4	4.2	4.8	2.8
Mn	org. Aufl.	0.5	0.6	0.7	1.9	0.3	0.5	0.6	1.3
	0-30 cm	1.8	0.7	3.3	2.6	1.1	4.2	3.3	2.0
	Gesamt	2.3	1.3	4.0	4.5	1.4	4.7	3.9	3.3
K	org. Aufl.	0.7	0.5	0.3	0.4	0.6	0.6	0.4	0.4
	0-30 cm	0.5	0.6	0.6	0.7	1.3	1.4	1.5	1.3
	Gesamt	1.2	1.1	0.9	1.1	1.9	2.0	1.9	1.7
Na	org. Aufl.	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2	0.1	0.1
	0-30 cm	0.0	0.4	0.2	0.5	0.9	1.3	1.0	1.1
	Gesamt	0.1	0.5	0.3	0.6	1.2	1.5	1.1	1.2

Tab. 41: Vertikalgradient und meliorationsbedingte Veränderung der pH-Werte, Al-, Fe- und Ca-Konzentrationen (mg/l) in GBL und WE (Versuch Großdick; Oktober 1984)

		GBL			WE		
Tiefe (cm)		KI	MW4	BI	KI	MW4	BI
pH	00-10	3.4	4.3	4.2	3.4	3.8	3.8
	10-20	3.9	4.5	4.7	3.7	3.9	4.0
	20-30	4.1	4.4	4.5	4.0	4.1	4.1
Al	00-10	5.1	9.5	1.1	29.3	24.8	23.2
	10-20	4.8	1.0	1.0	16.5	14.1	8.3
	20-30	1.3	5.3	6.2	10.5	8.0	6.3
Fe	00-10	9.9	12.9	22.7	90.5	24.8	19.7
	10-20	0.1	18.5	1.7	24.5	15.1	12.7
	20-30	0.1	0.1	0.1	8.0	7.4	3.1
Ca	00-10	11.6	34.0	41.8	18.3	157.7	156.3
	10-20	11.7	25.6	28.3	8.9	66.8	52.6
	20-30	9.2	18.8	21.1	7.3	24.5	22.9

der Bodentiefe für alle Versuchsglieder erkennbar. Die pH-Werte der GBL (3,4-4,7) variieren insgesamt auf höherem Niveau als jene des WE (3,4-4,1). Sowohl in der GBL als auch im WE übertreffen die pH-Werte auf den meliorierten Varianten MW4 und Bi die Vergleichswerte unter Kiefer.

Die Al- und Fe-Konzentrationen nehmen in beiden Lösungen im allgemeinen mit zunehmender Bodentiefe ab. Der Wasserextrakt der Kontrollflächen weist erwartungsgemäß höhere Al- und Fe-Konzentrationen auf als jener der meliorierten Böden, während in der GBL keine einheitliche Verschiebung aufscheint.

Für die meliorierten Flächen MW4 und BI sind höhere Ca-Konzentrationen in GBL und WE selbst noch in 30 cm Tiefe nachweisbar, wobei der WE die Meliorationswirkung besser zum Ausdruck bringt als die GBL. Dies entspricht dem Befund für den Versuch WAL 234 sowie für die KSt-Variante des Experiments WAL 228.

8.3.2 Vertikalgradient und meliorationsbedingte Veränderung der Mn-, K-, Na- und Mg-Konzentrationen (mg/l) in GBL und WE

Die Mn-, K-, Na- und Mg-Konzentrationen wurden durch die Meliorations-eingriffe weder in der GBL noch im WE nennenswert beeinflusst(s. D-6,7).

8.3.3 Vertikalgradient und meliorationsbedingte Veränderung der NH_4^+ -N-, NO_3^- -N-, Cl- und SO_4^{2-} -S-Konzentrationen (mg/l) in GBL und WE

Die Konzentrationen von NH_4^+ -N, Cl und SO_4^{2-} -S in GBL und WE nehmen mit der Bodentiefe ab. NO_3^- -N liegt bei beiden Methoden unter der Nachweisgrenze. Für NH_4^+ -N, Cl und SO_4^{2-} -S sind in den vergleichbaren Horizonten keine Unterschiede zwischen den Versuchsgliedern festzustellen (vergl. Anhang D-6,7).

8.3.4 Vergleich der Kationen- und Anionenäquivalentsummen und der prozentualen Anteile der Kationen (SKa in mmol IÄ/l) in GBL und WE

In Abb. 31 sind die prozentualen Anteile der einzelnen Kationen an der SKa in GBL und WE nach Versuchsglied und Tiefenstufe wiedergegeben (siehe auch Anhang D-9).

Mit zunehmender Bodentiefe gehen die Kationen- und die Anionenäquivalentsummen in GBL und WE zurück, wobei die SKa die SAN übertrifft. Diese Überlegenheit der SKa beruht vermutlich darauf, daß einerseits bei den Analysen die Hydrogencarbonat- und organischen Säure-Anionen nicht erfaßt wurden und man andererseits unter den Kationen auch Al und Fe in komplexierter Form am AAS mitbestimmte. Die Kationenüberschüsse sind besonders ausgeprägt für die Tiefenstufe 0-10 cm auf den meliorierten Flächen.

Nach beiden Verfahren lassen sich auf den meliorierten Parzellen eindeutig höhere Ca-Anteile an der SKa nachweisen als auf den Kiefer-Kontrollflächen. Na, K, Mg, Mn und $\text{NH}_4\text{-N}$ erreichen jeweils nur sehr geringe Anteile. Cl und $\text{SO}_4\text{-S}$ machen in GBL und WE 30 und 70 % bzw. 20 und 80 % der Anionenäquivalentsumme aus, da $\text{NO}_3\text{-N}$ nicht nachweisbar war und andere Anionen nicht erfaßt wurden.

8.3.5 Molverhältnisse von Ca/Al, Ca/H, Mg/Al und Mg/Ca in GBL und WE

Nach beiden Methoden übertreffen die Molverhältnisse von Ca/H und Ca/Al auf den meliorierten Varianten in allen Tiefenstufen die Vergleichswerte der Kontrollflächen. Bezüglich des Quotienten Mg/Ca ist hingegen die Kontrollvariante überlegen, während das Molverhältnis Mg/Al keinen einheitlichen Trend aufweist (vergl. Anhang D-8).

8.4 Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse aus dem Versuch Großdick

In diesem Experiment wurde angestrebt, den streugenutzten Standort durch die sogenannte Waldbrache zu sanieren und die Fruchtbarkeit des Bodens nachhaltig anzuheben. Ich konnte die Auswirkungen ver-

schiedener Meliorationsvarianten für die Versuchsglieder MW3, MW4 und Bi im Vergleich zu der Kiefern-Kontrollfläche (90 Jahre) überprüfen. Über die im einzelnen durchgeführten Maßnahmen sowie Düngermengen liegen im Versuchsprotokoll keine Aufzeichnungen vor. Nach dem bodenkundlichen Befund, Beobachtungen im Gelände sowie aus dem Vergleich mit anderen naheliegenden Versuchen läßt sich ungefähr folgender Ablauf der Meliorationseingriffe rekonstruieren:

Tab. 42: Beschreibung der wahrscheinlich angewendeten Meliorationsmaßnahmen im Experiment Großdick

Wahrscheinliche Meliorationsmaß- nahmen	Versuchsglied		
	MW3	MW4	Bi
Kahlschlag d. Kiefern	-	-	Kahlschlag u. Stockrodung
Auflichtung d. Kiefern	Stark	Stark	-
Bodenbearbeitung	oberflächlich	bis ca. 30 cm	oberflächlich
Pflanzung	BAh, SAh, WLi, HBu	BAh, SAh, WLi, HBu	Bi
Einsatz von Dauer-Lupine	ca. 6 kg/ha	ca. 6 kg/ha	ca. 6 kg/ha
Saat	-	-	Kräuter, Gräser
Düngung CaCO ₃	ca. 50 dt/ha	ca. 100 dt/ha	ca. 50 dt/ha
Weitere Maßnahmen	Teichschlamm	Teichschlamm	Teichschlamm

Die Auswertung des Meliorationsexperiments 36 Jahre nach der Versuchsbegründung zeigte, daß auf allen Meliorationsvarianten die Bodenazidität in der organischen Auflage und im obersten Mineralbodenbereich (0-10 cm) abgemindert war; auf Prüfglied MW4 mit der höheren Kalkgabe (und möglicherweise tiefergreifender Bodenbearbeitung?) war der pH-Wert sogar bis 30 cm Tiefe signifikant erhöht.

Der inaktive Rohhumus der Kiefern-Vergleichsflächen wurde von mullhaltigem Moder bis F-Mull abgelöst. Die Humusvorräte nahmen auf den beiden Meliorationsvarianten MW4 und Bi um rund 30 % ab. Auf der MW4-Fläche beschleunigten die vermutlich intensivere Bodenbearbeitung, die hohe Kalkmenge, das Vermischen von Auflagehumus und Teichschlamm mit dem Mineralboden und die Produktion von leicht zersetzlicher Lupinenstreu den Stoffumsatz so stark, daß mit derart hohen C-Ver-

lusten gerechnet werden mußte. Auf Prüfglied Bi, wo Kalkmenge und Bodenbearbeitungsintensität vermutlich niedriger waren als bei der MW4-Variante, wurde die Mineralisation durch das Klima auf der Kahlfläche zusätzlich angeregt, so daß ein Humusschwund in der gleichen Größenordnung auftrat. Auf der MW3-Fläche war der Abbau der Humusvorräte dagegen durch teilweise Überschirmung und geringere Kalkmenge begrenzt. Der starke Humusschwund auf Meliorationsvariante Bi geht einher mit nennenswerten Stickstoffverlusten von etwa 8 % des Ausgangskapitals. Im Unterschied zu den teilweise überschirmten MW3- und MW4-Parzellen war die Vegetation offenbar anfangs nicht dicht und leistungsfähig genug, um den aus beschleunigter Mineralisation freigesetzten Stickstoff aufzunehmen und zu konservieren. In den Mischwaldbeständen, die unter lichtem Kiefernschirm begründet wurden, führten dagegen Teichschlammgaben (?) und Einsaat von Dauerlupine zu einer N-Anreicherung im Oberboden um 6 (MW3) bzw. 13 % (MW4).

Die Genauigkeit der P-Bestimmung ist nicht ausreichend, um die geringen Differenzen zwischen den Versuchsgliedern interpretieren zu können. Die Unterlegenheit der MW4- und Bi-Parzellen im Vergleich zur Kontrolle deutet immerhin darauf hin, daß sie keine wesentliche P-Düngung erhielten und belegt damit, daß eine Begründung von Laubmischwäldern auf Phyllitsubstrat ohne P-Zufuhr möglich ist. Nur auf der MW3-Variante sprechen die merklich höheren P-Vorräte für eine Düngung zu Versuchsbeginn.

Die Humusform-Verbesserung mußte auf der MW3-Variante nur mit geringen Humusverlusten (ca. 8 %) erkaufte werden. Der Humusschwund aus der organischen Auflage wurde durch Humusmehrung im Mineralboden teilweise kompensiert. Dies läßt sich erklären mit dem Einmischen von Auflagehumus und Teichschlamm durch schwache, nur lokale und oberflächliche Bodenbearbeitung sowie vergleichsweise niedrige Kalkgabe (anders als bei MW4). Damit erweist sich die Variante MW3 gegenüber den übrigen Varianten als vorteilhafter. Noch einmal sei darauf hingewiesen, daß die Stickstoff- (6 %) sowie insbesondere die Phosphorvorräte (17 %) auf dieser Meliorationsvariante MW3 ebenfalls deutlich verbessert sind.

Die Gesamtgehalte an Mg, K, Na, Fe und Mn wurden durch die Meliorationsmaßnahmen lediglich in der organischen Auflage signifikant beeinflusst. Die dort erhöhten Gehalte dürften vorwiegend auf der Ein-

mischung von Mineralboden durch flache Bodenbearbeitung und angeregter Bioturbation beruhen. Auch die Gesamtvorräte an K, Na, Fe, Al und Mn der einzelnen Prüfglieder weichen nicht signifikant voneinander ab. Allerdings schneidet die Parzelle MW3 in der Mg-Ausstattung schlechter ab als die anderen Varianten, was ich auf a priori-Unterschiede im Substrat zurückführe.

Die Meliorationsmaßnahmen bewirkten des weiteren eine eindeutige Zunahme der Kationenaustauschkapazität in der organischen Auflage und in den obersten 10 cm des Mineralbodens sowie der Basensättigung bis 30 cm Tiefe. Auf allen Meliorationsvarianten ist die Ca-Sättigung zu Lasten der Anteile von H, Al und Fe angestiegen. Alle Meliorationsvarianten weisen im Vergleich zur Kiefern-Vergleichsfläche auch leicht erhöhte Mg-, Mn- und K-Sättigungen auf. Die Na-Sättigung wurde dagegen durch die Melioration kaum beeinflusst.

Die Meliorationseffekte spiegeln sich auch in der GBL und im WE wider (einziger Entnahmetermin: Oktober 1984). Die pH-Werte sowie die Ca-Konzentrationen beider Lösungen liegen in der Regel bis 20 cm Tiefe eindeutig über den Vergleichswerten der Kontrollparzellen. Wie bei anderen Versuchen konnte ich in der GBL der meliorierten Flächen höhere Al- und Fe-Konzentrationen nachweisen als auf der Vergleichsvariante, nicht jedoch im WE. Die Konzentrationen von Mn, K, Na und Mg wurden durch die Meliorationsverfahren kaum beeinflusst.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die - nicht definierten - Meliorationsmaßnahmen sich auch 36 Jahre nach Anlage des Experiments noch deutlich in der Humusform, den Gesamtvorräten an C, N und Ca, der Bodenreaktion, dem Kationenaustauschbelag und in der Bodenlösung widerspiegeln. Die Fruchtbarkeit der degradierten Phyllitböden ist dadurch so gesteigert worden, daß auch anspruchsvolle Baumarten wie Bergahorn, Spitzahorn, Winterlinde und Buche gedeihen können. Es gilt jetzt nur zu entscheiden, welche Parameter - Elementvorräte, Kennwerte der KAK oder Zusammensetzung der Bodenlösung - diesen Fruchtbarkeitsanstieg am besten zum Ausdruck bringen.

9. Diskriminanzanalytische Überprüfung der boden- und nadelanalytischen Verfahren auf ihre Eignung zur Erfassung von Meliorationswirkungen im Versuch WAL 234

9.1 Problemstellung

Meliorationsbedingte Änderungen in der Baumschicht und im Boden von Waldökosystemen werden oft durch ertragskundliche, nadel- und/oder bodenanalytische Verfahren charakterisiert. Meliorationseffekte beziehen sich häufig nicht nur auf einen Parameter, sondern können z. B. die gesamte Konstellation der Nährelementgehalte in den pflanzl. Geweben o. im Boden ändern. Im allgemeinen wird jeder Kennwert z.B. durch Varianztests für sich allein betrachtet und geprüft. In diesem Abschnitt möchte ich herausfinden, wie die Nährelementgehalte im Boden und in den Nadeln zusammengefaßt die verschiedenen Meliorationsmaßnahmen widerspiegeln und somit für eine Trennung der Versuchsglieder benutzt werden können. Zur Prüfung wird das Verfahren der stufenweisen Diskriminanzanalyse angewendet. Hierfür wurde der Versuch WAL 234 herangezogen, der die meisten Wiederholungen aufweist und für den die Datensätze am vollständigsten vorliegen. Jede untersuchte Parzelle gehört einer bestimmten Prüfvariante an; die Ergebnisse jedes bodenanalytischen Untersuchungsverfahrens bzw. die Nadelanalysen werden jeweils getrennt diskriminanzanalytisch verrechnet. Eine Analysenmethode ist umso besser geeignet, Meliorationseffekte zu erfassen, je besser die einzelnen Parzellen mit Hilfe des spezifischen Datensatzes den einzelnen Prüfgliedern (Meliorationsvarianten) zugeordnet werden.

9.2 Prinzip der Diskriminanzanalyse und Prüfverfahren

Bei der Diskriminanzanalyse werden lineare Funktionen von Variablen zum Zweck der Diskriminierung von Grundgesamtheiten analysiert, d. h. die Populationen sollen aufgrund der in den Variablen enthaltenen Information getrennt werden. Mit Hilfe dieser Funktionen werden dann die einzelnen Fälle den Gruppen (Versuchsgliedern, Meliorationsvarianten) rechnerisch zugeordnet. Die Gesamtkonstellation der (getrennt nach Analysenmethoden) eingegebenen Boden- bzw. Nadel-Parameter weicht zwischen den Versuchsvarianten umso mehr voneinander ab, je

größer der Prozentsatz der richtigen Zuordnung mittels Diskriminanzanalyse ist.

Der Multivariablen-Test zur Prüfung von Gruppenunterschieden erfolgte nach dem Programm P7M-BMDP, Fassung 83, der Universität California. Getrennt für jedes Analysenverfahren wurde eine schrittweise Diskriminanzanalyse durchgeführt. Tab. 43 informiert über die einbezogenen Parameter. Das Programm liefert Informationen über die Jackknifed-Klassifikationen sowie über die Klassifikationsmatrizen. Bei der Klassifikationsmatrix wird die jeweils abschließende Zuordnung der verschiedenen Versuchsglieder, die den vergleichsweise höchsten Weiserwert nachweist, dargestellt. Die Jackknifed-Klassifikation stellt eine Überprüfung der Diskriminanzanalyse auf Irrtumswahrscheinlichkeit dar. Hierbei wird für jede Versuchsparzelle (Fall) eine Zuordnungsfunktion aus den Werten der restlichen Fälle errechnet. Die Gruppentrennung durch die Diskriminanzanalyse ist umso mehr gesichert, je besser die Zuordnung auch durch die Jackknifed-Klassifikation erfolgt.

Tab. 43: In die Diskriminanzanalyse einbezogene Parameter(Exp. WAL 234)

Methode	Einbezogene Variable		
	Teil I	Teil II	Teil III
Gesamtaufschluß	Al, Fe, Mn, K, Na, Ca, Mg	C, N, P, Zn, Cu, pH-H ₂ O, pH-CaCl ₂	
KAK-Perkolation	H, Al, Fe, Mn, K, Na, Ca, Mg	pH des Perkoliats	
KAK-Schüttelextr.	w.o.	pH des Extrakts	
GBL	w.o.	pH der Lösung	NH ₄ -N, NO ₃ -N, Cl, SO ₄ -S
2:1 Wasserextrakt	w.o.	pH des 2:1 Wasserextrakts	w.o.
Nadelanalysen	N, P, K, Ca, Mg	Fe, Mn, Zn, Cu, Al	

Der ganze Rechenablauf läuft stufenweise ab. Es wird zunächst die Variable mit dem jeweils höchsten F-Wert in die Rechnung einbezogen; nacheinander folgen die anderen signifikanten Variablen bis herunter zu einem Grenzwert von 4. Bei jedem Rechenschritt werden auch die bereits ausgeschiedenen Variablen berücksichtigt. Auf die ökologische Bedeutung der ausgeschiedenen Variablen wird hier nicht eingegangen.

Ferner sind in den Summen-Tabellen (Programm P7M) für jede Rechenstufe auch WILKS Lambda (U-Statistik) und der approximative F-Wert (approximate F-Statistic) zu Lambda angegeben. Der Datenumfang bestimmt sehr stark die Größenordnung der U- und F-Statistikwerte. Je geringer für einen gegebenen Datenumfang der U-Statistikwert ist, desto weiter sind die Gruppenmittelwerte voneinander entfernt. Je höher der F-Wert zu Lambda ist, desto geringer ist die Streuung der Fälle um den Gruppenmittelwert.

In den folgenden Abbildungen erscheinen (getrennt nach Bodenlage und Analysenmethode) die geometrischen Interpretationen der Diskriminanzanalysenergebnisse. Der Gruppen-(Prüfglied) Mittelwert wird als Zahl, jeder Fall (Versuchsparzelle) durch einen Buchstaben gekennzeichnet. Sie werden in die Hyperebene eingezeichnet, die so ausgewählt ist, daß die Gruppen (Versuchsglieder) am besten getrennt erscheinen. Solche Darstellungen werden aus den Beziehungen zwischen den relevanten kanonischen Variablen hergeleitet, die wiederum aus den ursprünglichen Variablen errechnet werden.

Dabei bedeuten in den Tabellen und Abbildungen:

KON, K = 1 Kontrolle
VOLL, V = 2 Volldüngung
LUP, L = 3 Lupinen-Unterbau.

9.3 Beurteilungskriterium für die Ergebnisse

Je höher der Prozentsatz der richtigen Zuordnungen durch die gewählte Klassifikation ist, desto deutlicher weichen die Versuchsvarianten voneinander ab. Aus den genannten Gründen wird die Interpretation der Ergebnisse vorwiegend anhand der Jackknifed-Klassifikation erfolgen, da diese schärfer trennt.

Darüberhinaus wird die graphische Darstellung zur Beurteilung der Trennschärfe zwischen den Versuchsgliedern berücksichtigt. Auf eine zusätzliche Interpretation der U- und F-Statistik (Streuung der Gruppenmittelwerte) wurde lediglich im Zweifelsfall zurückgegriffen.

9.4 Ergebnisse der schrittweisen Diskriminanzanalyse unter Verwendung der Gesamtelementgehalte im Boden

Es wurde zunächst eine Diskriminanzanalyse unter Verwendung der Gesamtgehalte von K, Ca, Mg, Na, Al, Fe und Mn durchgeführt; unberücksichtigt blieben hierbei C, N, P, Zn, Cu und der pH-Wert. Die Überprüfung durch die Jackknifed-Klassifikation ergab nur für die organische Auflage eine vollkommene Trennung nach den Versuchsgliedern. Für den Mineralboden war diese Diskriminanzanalyse rechnerisch nur für die oberste Lage (0-10 cm) möglich; die Jackknifed-Klassifikation führte hier in 44 % der Fälle zu richtiger Differenzierung. In einem zweiten Verfahrensschritt wurden danach alle Parameter in die Rechnung einbezogen. Tab. 44 informiert über die Ergebnisse der Jackknifed-Klassifikation.

Tab. 44: Jackknifed-Klassifikation der Diskriminanzanalyse für die Gesamtelementgehalte. Versuch WAL 234

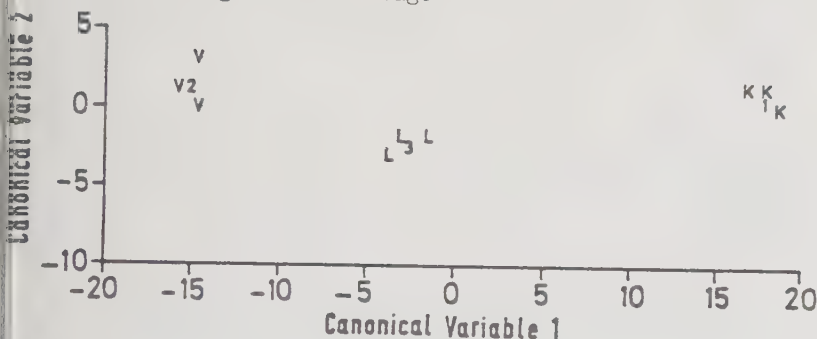
Tiefe : org. Auflage					Tiefe : 0-10 cm				
Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP
KON	100.0	3	0	0	KON	100.0	3	0	0
VOLL	100.0	0	3	0	VOLL	100.0	0	3	0
LUP	100.0	0	0	3	LUP	100.0	0	0	3
TOTAL	100.0	3	3	3	TOTAL	100.0	3	3	3

Tiefe : 10-20 cm					Tiefe : 20-30 cm				
Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP
KON	100.0	3	0	0	KON	0.0	0	2	1
VOLL	66.7	0	2	1	VOLL	0.0	3	0	0
LUP	66.7	0	1	2	LUP	100.0	0	0	3
TOTAL	77.8	3	3	3	TOTAL	33.3	3	2	4

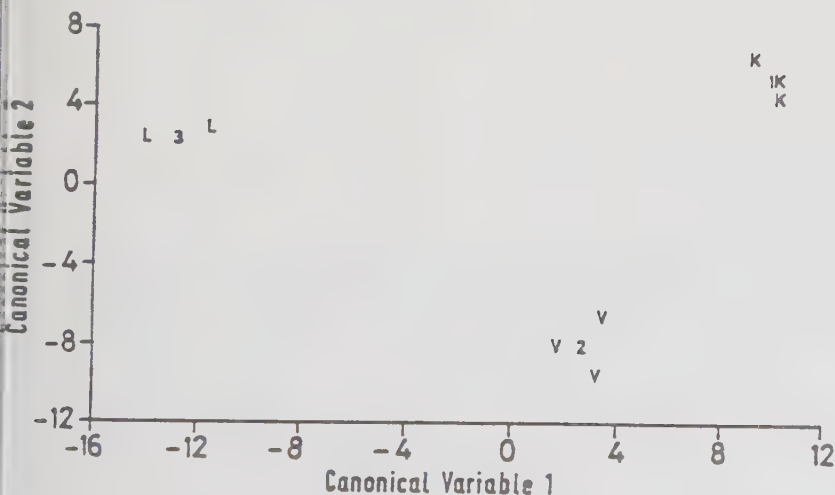
Man erkennt, daß die Versuchsparzellen auch unter Berücksichtigung aller dieser Parameter lediglich für die organische Auflage und für die Tiefenstufe 0-10 cm exakt nach Prüfgliedern getrennt werden. Im unteren Bodenbereich, d. h. für die Lagen 10-20 bzw. 20-30 cm, liegen die Quoten richtiger Zuordnung bei 78 % bzw. 33 %. Darin deutet sich an, daß die Meliorationsmaßnahmen den Oberboden stärker beeinflussen als den tieferen Mineralbodenbereich. Die zugehörigen Abbildungen (32 a, b, c, d) lassen ebenfalls in der obersten Profilstufe eine klare Differenzierung zwischen den Versuchsvarianten mit minimaler

Abb. 32: Schrittweise Diskriminanzanalyse: Beziehungen zwischen den ersten beiden kanonischen Variablen und den Gruppenmittelwerten (Prüfglieder) für die Gesamtaufschlußmethode im Versuch WAL 234

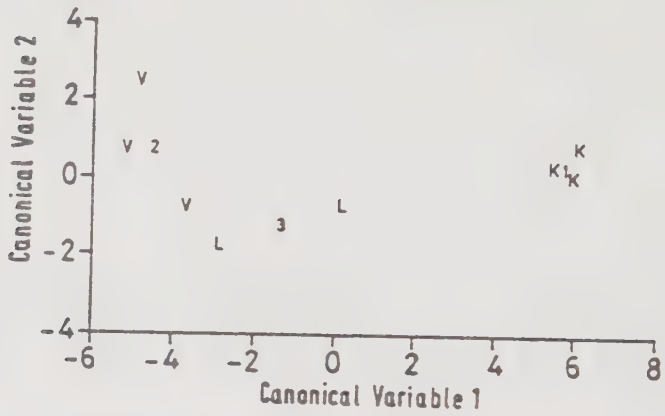
a) Organische Auflage



b) 0-10 cm



c) 10-20 cm



d) 20-30 cm



Variation der Parzellen um den Versuchsgliedmittelwert erkennen. Im unteren Bodenbereich nimmt die Schärfe der Trennung zwischen den Versuchsvarianten ab, und die Streuung um den Versuchsgliedmittelwert steigt an.

9.5 Ergebnisse der schrittweisen Diskriminanzanalyse unter Verwendung der Kennwerte der effektiven KAK (Perkolationsmethode)

In Tab. 45 sowie in den Abb. 33 a, b, c, d sind die Ergebnisse der Jackknifed-Klassifikation für diesen Parametersatz aufgeführt.

Sie trennt die Versuchsglieder zu 100 bzw. 89 % richtig in den Tiefenstufen 0-10 und 10-20 cm. In der organischen Auflage und in der Tiefenstufe 20-30 cm war die Zuordnung allerdings unbefriedigend (33 % bzw. 44 %) richtige Zuordnung). Dieses Ergebnisse hängt möglicherweise damit zusammen, daß sowohl für die Proben aus der organischen Auflage als auch für jene aus der Tiefenstufe 20-30 cm die vorgeschriebenen Perkolationszeiten nicht exakt eingehalten werden konnten.

Tab. 45: Jackknifed-Klassifikation der Diskriminanzanalyse für die Kennwerte der effektiven KAK. Versuch WAL 234

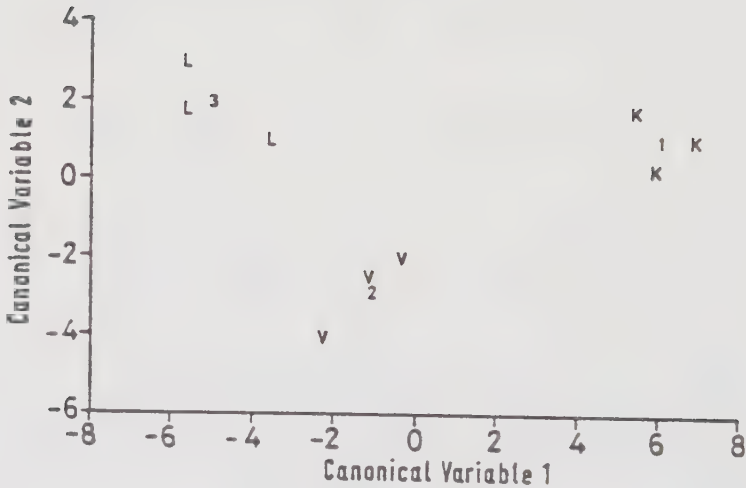
Tiefe : org. Auflage					Tiefe : 0-10 cm				
Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP
KON	100.0	3	0	0	KON	100.0	3	0	0
VOLL	0.0	0	0	3	VOLL	100.0	0	3	0
LUP	0.0	0	3	0	LUP	100.0	0	0	3
TOTAL	33.3	3	3	3	TOTAL	100.0	3	3	3
Tiefe : 10-20 cm					Tiefe : 20-30 cm				
Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP
KON	100.0	3	0	0	KON	100.0	3	0	0
VOLL	100.0	0	3	0	VOLL	0.0	0	0	3
LUP	66.7	0	1	2	LUP	33.3	0	2	1
TOTAL	88.9	3	4	2	TOTAL	44.4	3	2	4

Abb. 33: Schrittweise Diskriminanzanalyse: Beziehungen zwischen den ersten beiden kanonischen Variablen und den Gruppenmittelwerten (Prüfglieder) für das Perkulationsverfahren im Versuch WAL 234

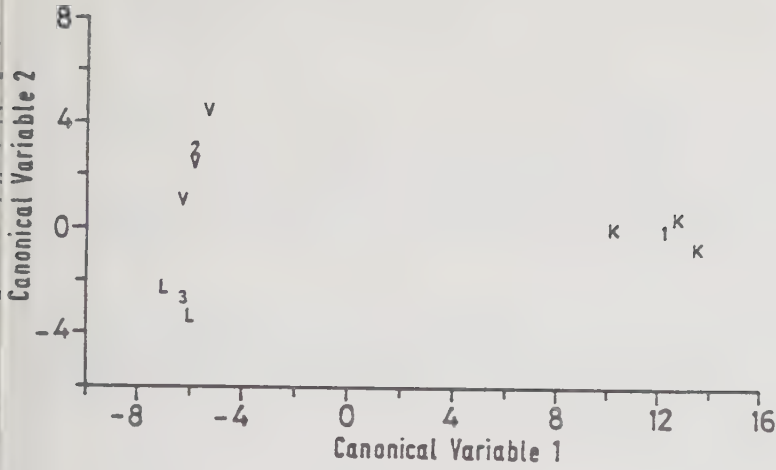
a) Organische Auflage



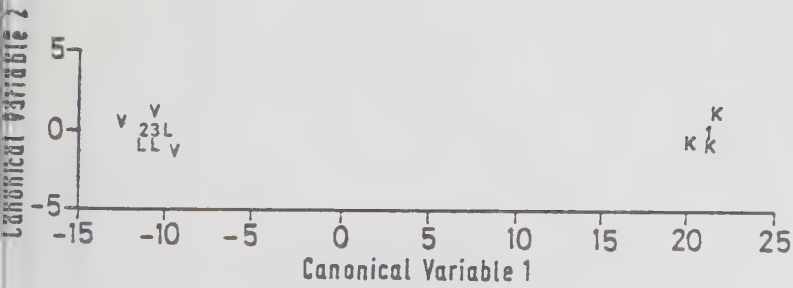
b) 0-10 cm



c) 10-20 cm



d) 20-30 cm



9.6 Ergebnisse der schrittweisen Diskriminanzanalyse unter Verwendung der Gehalte an NH_4Cl -extrahierbaren Kationen (Schüttelextraktmethode)

Aus Tab. 46 und den Graphiken 34 a, b, c, d ist zu ersehen, daß die Kennwerte nach der Schüttelextraktmethode in allen Bodentiefen die Versuchsparzellen schärfer trennen als jene nach der Perkulationsmethode (vgl. 10.5). Wir beobachten fast immer eine relativ engere Scharung der Einzelfälle um die mittlere Gruppenposition (außer in der Bodenlage 0-10 cm).

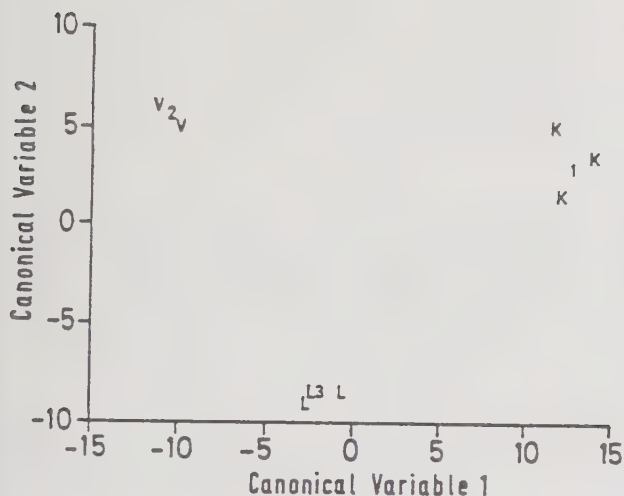
Die Überprüfung zeigt deutlich, daß nach der Schüttelextraktmethode eine bessere Differenzierung zwischen den Versuchsvarianten erreicht wird als nach der Perkulationsmethode. Vermutlich ist dieses günstigere Abschneiden auf die bessere Standardisierung der Extraktionsbedingungen zurückzuführen.

Tab. 46: Jackknifed-Klassifikation der Diskriminanzanalyse für die Gehalte an in 0,5 M NH_4Cl -extrahierbaren Kationen. Versuch WAL 234

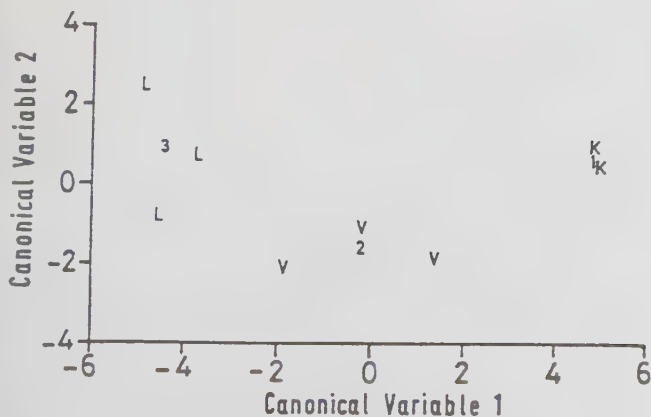
Tiefe : org.Auflage					Tiefe : 0-10 cm				
Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP
KON	100.0	3	0	0	KON	100.0	3	0	0
VOLL	100.0	0	3	0	VOLL	66.7	0	2	1
LUP	100.0	0	0	3	LUP	100.0	0	0	4
TOTAL	100.0	3	3	3	TOTAL	88.9	3	2	4
Tiefe : 10-20 cm					Tiefe : 20-30 cm				
Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP
KON	100.0	3	0	0	KON	100.0	3	0	0
VOLL	100.0	0	3	0	VOLL	100.0	0	3	0
LUP	100.0	0	0	3	LUP	100.0	0	0	3
TOTAL	100.0	3	3	3	TOTAL	100.0	3	3	3

Abb. 34: Schrittweise Diskriminanzanalyse: Beziehungen zwischen den ersten beiden kanonischen Variablen und den Gruppenmittelwerten (Prüfglieder) für das Schüttel-extraktverfahren im Versuch WAL 234

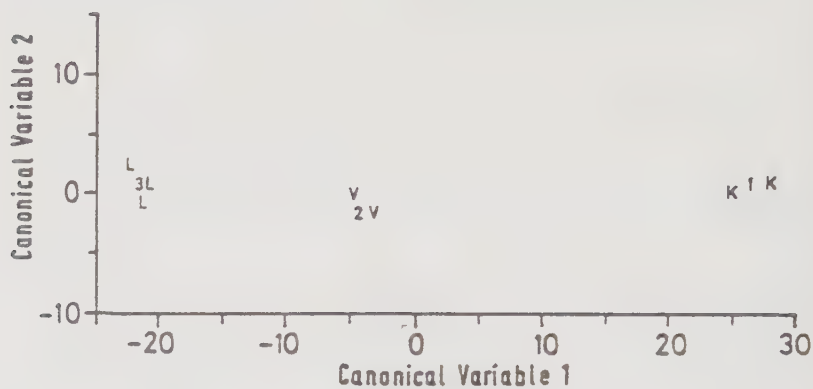
a) Organische Auflage



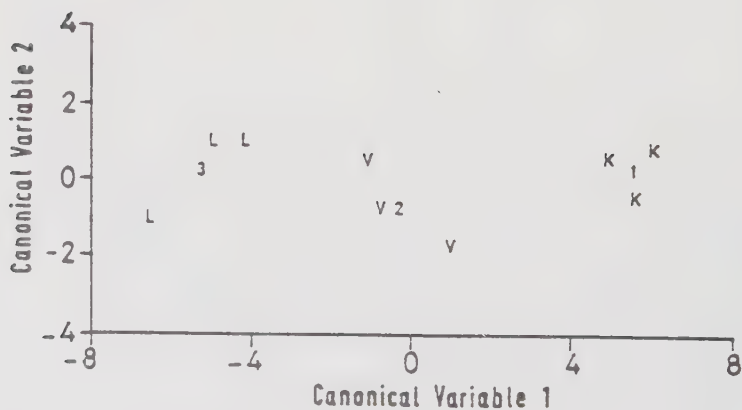
b) 0-10 cm



c). 10-20 cm



d) 20-30 cm



9.7 Ergebnisse der schrittweisen Diskriminanzanalyse unter Verwendung der Element-Konzentrationen in der GBL

Wie die Ergebnisse der Jackknifed-Klassifikation für April (Tab. 47 a) zeigen, werden die Versuchsvarianten in der Oberbodenlage vollkommen (100 %), in den Tiefenstufen 10-20 cm zu 89 % und 20-30 cm nur zu 67 % richtig zugeordnet. Auch aus den Graphiken für den Entnahmetermin April (35 a, b, c) geht hervor, daß die Versuchsglieder lediglich im Oberboden eindeutig diskriminiert werden, nicht aber im unteren Bodenbereich.

Für den Entnahmetermin Juli (Tab. 47 b) trennt die Jackknifed-Klassifikation in den Tiefenstufen 0-10 und 10-20 cm zu 90 % und in 20-30 cm zu 100 % richtig nach Versuchsvarianten. Die entsprechenden Graphiken (36 a, b, c) bestätigen diese eindeutige Differenzierung.

Die Ergebnisse der Jackknifed-Klassifikation unter Verwendung der GBL-Kennwerte für den Oktober-Termin sind dagegen wieder deutlich ungünstiger (vgl. Tab. 47 c und Abb. 37 a, b, c). Es bleibt also festzuhalten, daß die GBL-Analyse nur im Juli eine scharfe Diskriminierung zwischen den Prüfgliedern erlaubt.

9.8 Ergebnisse der schrittweisen Diskriminanzanalyse unter Verwendung der Element-Konzentrationen im 2:1-Wasserextrakt

Aus Tab. 48 a geht hervor, daß die Jackknifed-Klassifikation anhand der WE-Extraktkennwerte vom April im Oberboden die Parzellen zu 100 % korrekt den Prüfgliedern zuordnet. In 10-20 und 20-30 cm Bodentiefe liegen die Quoten richtiger Zuordnung dagegen nur bei 89 % bzw. 78 %. Noch genauer spiegeln sich in den Graphiken (38 a, b, c) die richtigen Zuordnungsquoten wider; diese Abbildungen zeigen nämlich außer einer überwiegend richtigen Differenzierung der Versuchsglieder auch eine niedrige Streuung der Parzellen um den Variantenmittelwert.

Auch die WE-Kennwerte des Juli-Termins erlauben über die Jackknifed-Klassifikation eine gute Diskriminierung zwischen den Versuchsgliedern (89-100 % in den verschiedenen Tiefenstufen) (Tab. 48 b und Abb. 39 a, b, c).

Auch für den Entnahmetermin Oktober erreichen die Zuordnungsquoten hohe Werte zwischen 78 und 100 % (Tab. 48 c und Abb. 40 a, b, c).

Tab. 47: Jackknifed-Klassifikation der Diskriminanzanalyse für die Kennwerte der GEL
nach Entnahmetermin im Experiment WAL 234

a) Termin 8404

Tiefe (cm)	0-10						10-20						20-30							
	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP
KON	KON	100.0	3	0	0	KON	100.0	3	0	0	KON	100.0	0	0	0	KON	100.0	0	0	0
VOLL	VOLL	100.0	0	3	0	VOLL	100.0	0	3	0	VOLL	66.7	3	2	1	VOLL	66.7	3	2	1
LUP	LUP	100.0	0	0	3	LUP	66.7	0	1	2	LUP	33.3	0	2	1	LUP	33.3	0	2	1
TOTAL	TOTAL	100.0	3	3	3	TOTAL	88.9	3	4	2	TOTAL	66.7	3	4	2	TOTAL	66.7	3	4	2

b) Termin 8407

Tiefe (cm)	0-10						10-20						20-30							
	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP
KON		66.7	2	1	0	KON	100.0	3	0	0	KON	100.0	3	0	0	KON	100.0	3	0	0
VOLL		100.0	0	3	0	VOLL	66.7	0	2	1	VOLL	100.0	0	3	0	VOLL	100.0	0	3	0
LUP		100.0	0	0	3	LUP	100.0	0	0	3	LUP	100.0	0	0	3	LUP	100.0	0	0	3
TOTAL		88.9	2	4	3	TOTAL	88.9	3	2	4	TOTAL	100.0	3	3	3	TOTAL	100.0	3	3	3

c) Termin 8410

Tiefe (cm)	0-10						10-20						20-30							
	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP
KON	66.7	2	1	0	0	KON	100.0	3	0	0	KON	100.0	3	0	0	KON	100.0	3	0	0
VOLL	66.7	0	2	1	1	VOLL	33.3	0	1	2	VOLL	100.0	0	3	0	VOLL	100.0	0	3	0
LUP	33.3	0	2	1	1	LUP	66.7	0	1	2	LUP	66.7	0	1	2	LUP	66.7	0	1	2
TOTAL	55.6	2	5	2	2	TOTAL	66.7	3	1	4	TOTAL	88.9	3	4	2	TOTAL	88.9	3	4	2

a) Termin 8404

Tiefe (cm)	0-10						10-20						20-30					
	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP			
KON	100.0		3	0	0	KON	100.0	3	0	0	KON	100.0	3	0	0			
VOLL	100.0		0	3	0	VOLL	100.0	0	3	0	VOLL	66.7	1	2	0			
LUP	100.0		0	0	3	LUP	66.7	0	1	2	LUP	66.7	0	1	2			
TOTAL	100.0		3	3	3	TOTAL	88.9	3	4	2	TOTAL	77.8	4	3	2			

b) Termin 8407

Tiefe (cm)	0-10						10-20						20-30							
	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP
KON	100.0		3	0	0	KON	100.0	3	0	0	KON	100.0	3	0	0	KON	100.0	3	0	0
VOLL	100.0		0	3	0	VOLL	100.0	0	3	0	VOLL	100.0	0	3	0	VOLL	100.0	0	3	0
LUP	66.7		0	1	2	LUP	66.7	0	1	2	LUP	100.0	0	0	3	LUP	100.0	0	0	3
TOTAL	88.9		3	4	2	TOTAL	88.9	3	4	2	TOTAL	100.0	3	3	3	TOTAL	100.0	3	3	3

c) Termin 8410

Tiefe (cm)	0-10						10-20						20-30							
	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP	Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP
KON	100.0		3	0	0	KON	100.0	3	0	0	KON	100.0	3	0	0	KON	100.0	3	0	0
VOLL	100.0		0	3	0	VOLL	100.0	0	3	0	VOLL	33.3	1	1	1	VOLL	100.0	1	1	1
LUP	100.0		0	0	3	LUP	100.0	0	0	3	LUP	100.0	0	0	3	LUP	100.0	0	0	3
TOTAL	100.0		3	3	3	TOTAL	100.0	3	3	3	TOTAL	77.8	4	1	4	TOTAL	77.8	4	1	4

Abb. 35: Schrittweise Diskriminanzanalyse: Beziehungen zwischen den ersten beiden kanonischen Variablen und den Gruppenmittelwerten (Prüfglieder) für die Kennwerte der Gleichgewichtsbodenlösung im Versuch WAL 234 (April)

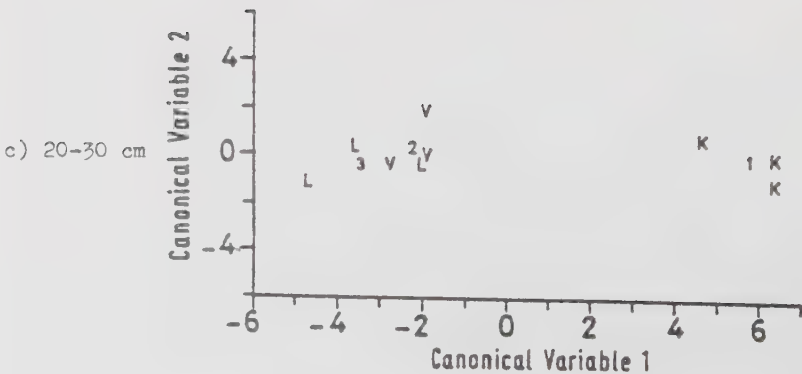
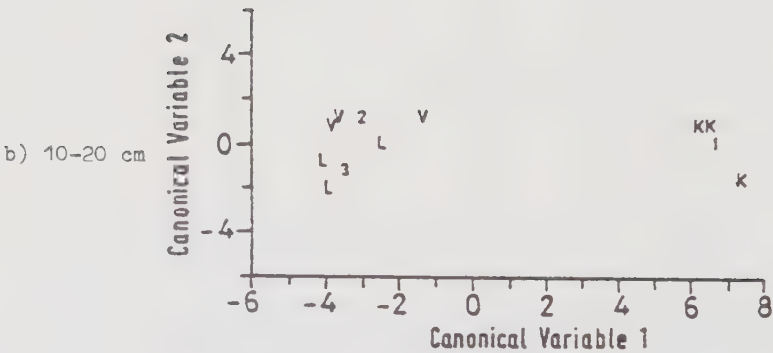
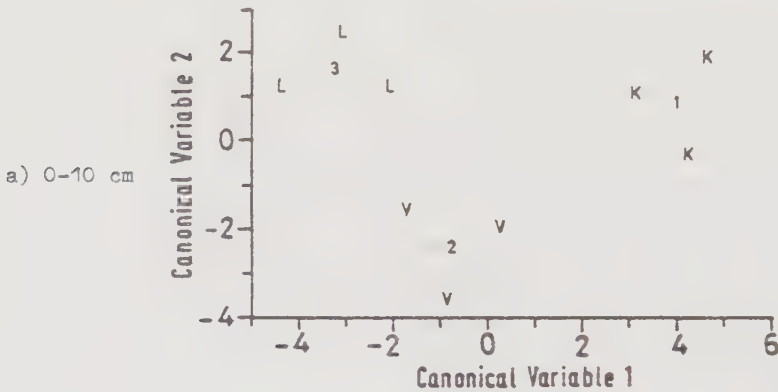
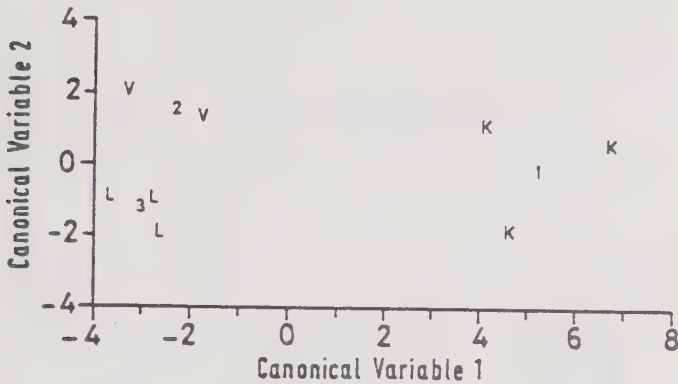
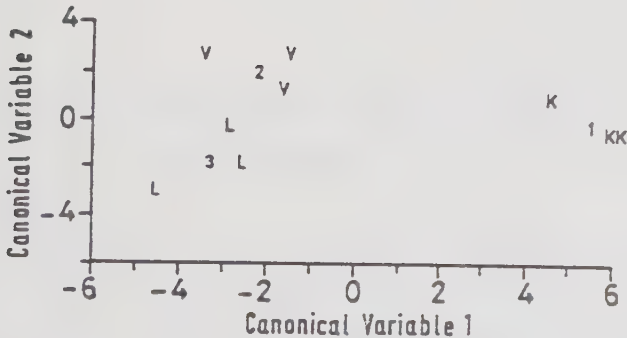


Abb. 36: Schrittweise Diskriminanzanalyse: Beziehungen zwischen den ersten beiden kanonischen Variablen und den Gruppenmittelwerten (Prüfglieder) für die Kennwerte der Gleichgewichtsbodenlösung im Versuch WAL 234 (Juli)

a) 0-10 cm



b) 10-20 cm



c) 20-30 cm

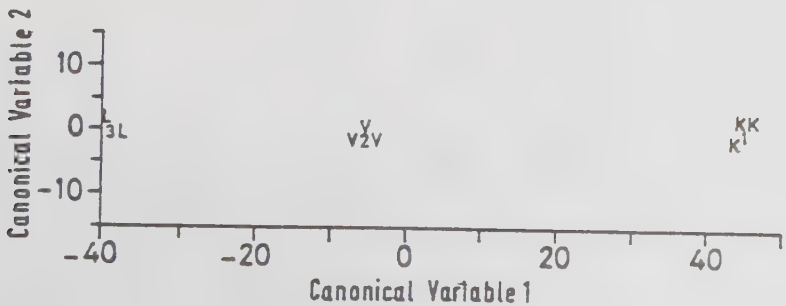
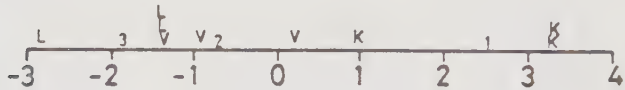
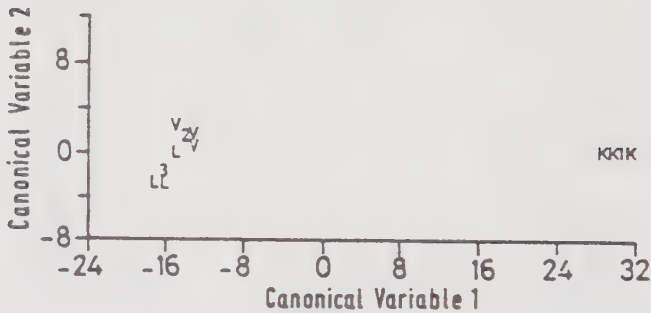


Abb. 37: Schrittweise Diskriminanzanalyse: Beziehungen zwischen den ersten beiden kanonischen Variablen und den Gruppenmittelwerten (Prüfglieder) für die Kennwerte der Gleichgewichtsbodenlösung im Versuch WAL 234 (Oktober)

a) 0-10 cm



b) 10-20 cm



c) 20-30 cm

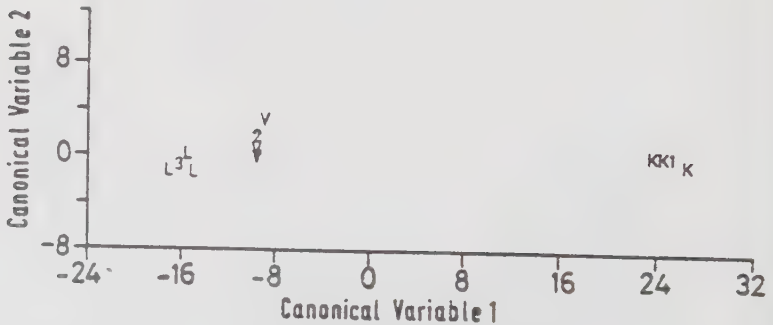


Abb. 38: Schrittweise Diskriminanzanalyse: Beziehungen zwischen den ersten beiden kanonischen Variablen und den Gruppenmittelwerten (Prüfglieder) für die Kennwerte des Wasserextrakts im Versuch WAL 234 (April)

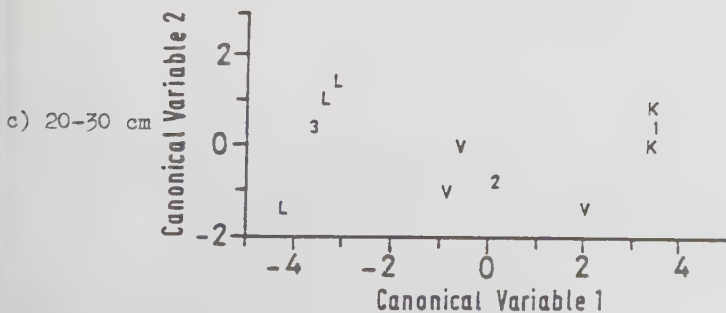
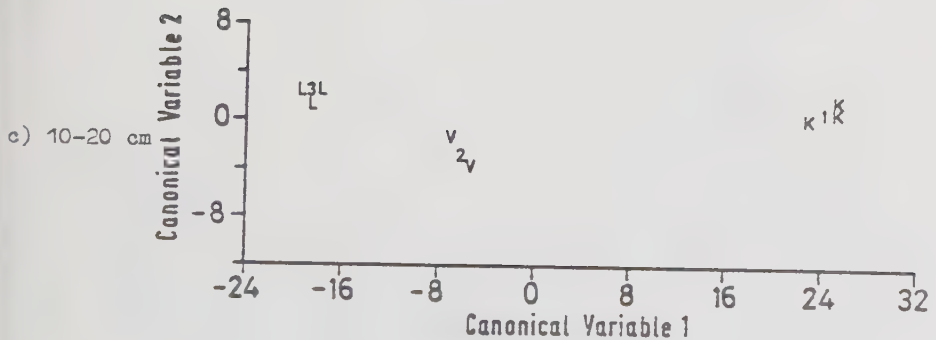
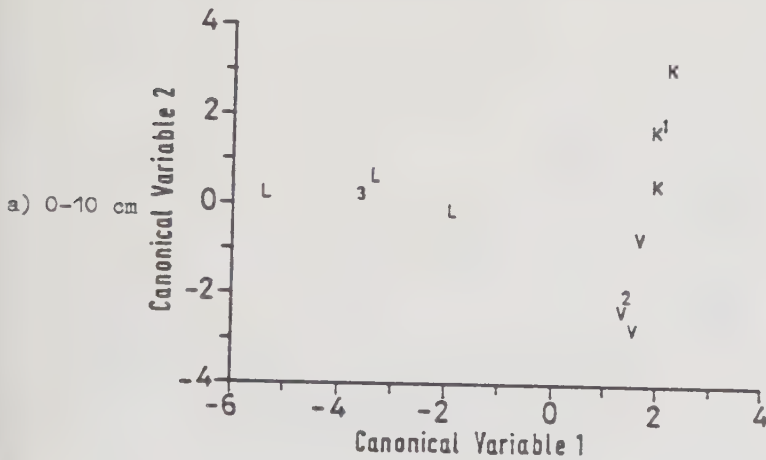
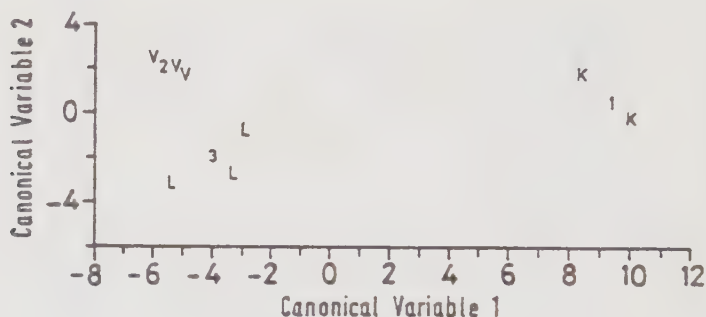
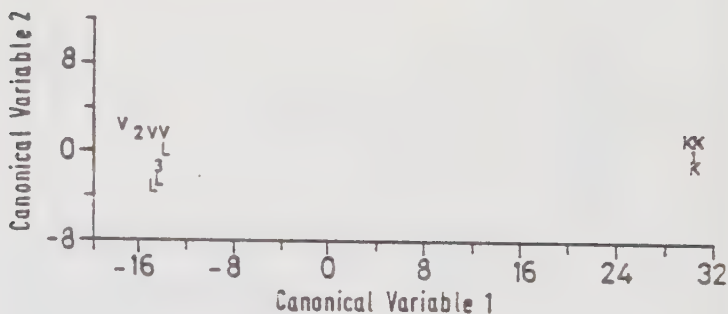


Abb. 39: Schrittweise Diskriminanzanalyse: Beziehungen zwischen den ersten beiden kanonischen Variablen und den Gruppenmittelwerten (Prüfglieder) für die Kennwerte des Wasserextrakts im Versuch WAL 234 (Juli)

a) 0-10 cm



b) 10-20 cm



c) 20-30 cm

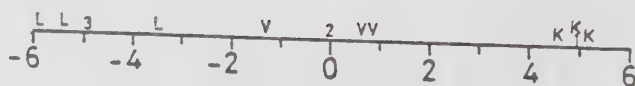
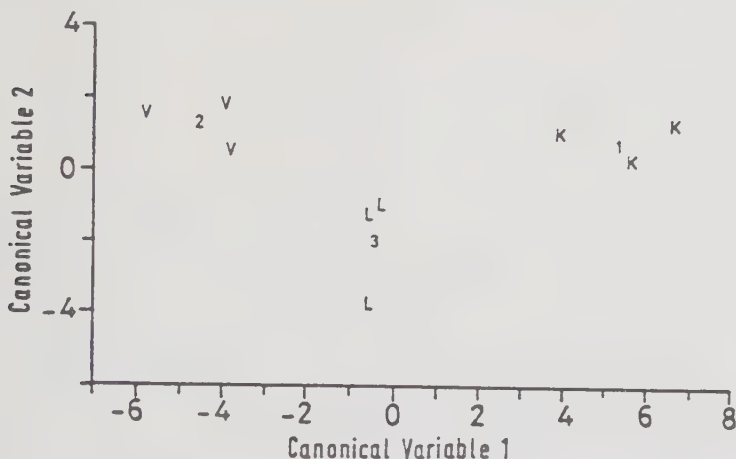
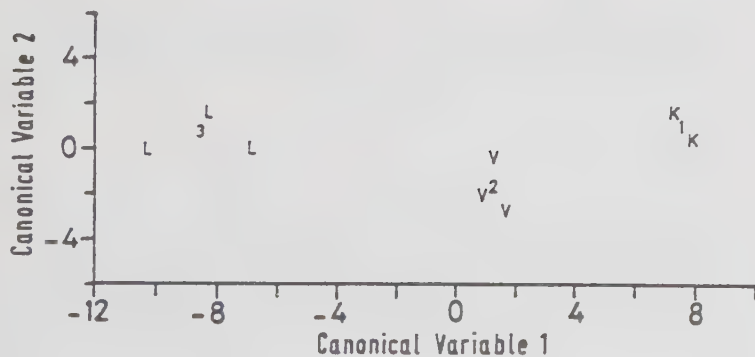


Abb. 40: Schrittweise Diskriminanzanalyse: Beziehungen zwischen den ersten beiden kanonischen Variablen und den Gruppenmittelwerten (Prüfglieder) für die Kennwerte des Wasserextrakts im Versuch WAL 234 (Oktober)

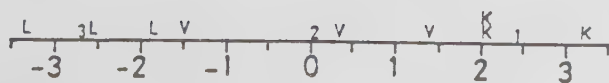
a) 0-10 cm



b) 10-20 cm



c) 20-30 cm



Insgesamt ist festzuhalten, daß die Kennwerte des Wasserextrakts für die meisten Termine und Tiefenstufen über die Diskriminanzanalyse eine schärfere Trennung zwischen den Prüfvarianten ermöglichen als jene der GEL. Vermutlich beruht dieser Befund auf der besseren Standardisierung des Analysenverfahrens.

9.9 Ergebnisse der Diskriminanzanalysen mit Hilfe der Makro- und Mikro (Untersuchungszeitraum 1980-1984)

Wie die Jackknifed-Klassifikation einer diskriminanzanalytischen Verrechnung zeigt, werden die Versuchsglieder dadurch nur unvollständig getrennt (67 %). Die zugehörige Graphik (41 a) weist dazu auch eine starke Überlappung der Meliorationsflächen auf. Dieser Befund ist verständlich; auf den durch Volldüngung und Lupinenunterbau meliorierten Parzellen reagieren die Kiefern übereinstimmend mit verbesserter N-, P-, Ca- und Mg-Versorgung. Die Kiefern auf den verschiedenartig behandelten Düngungsvarianten unterscheiden sich im Ernährungszustand zwar deutlich von den unbehandelten Kontrollen, nicht aber untereinander, was die unbefriedigende Diskriminierung erklärt.

Es wurde außerdem versucht, eine bessere Trennung der Versuchsglieder zu erreichen, indem man für die Spiegelwerte der Makro-u. Mikronährelemente getrennte Diskriminanzanalysen durchführte. Die Ergebnisse sind in den Tab. 49 b und 49 c aufgeführt. Sie zeigen deutlich, daß durch dieses Vorgehen keine bessere Zuordnung erreicht werden konnte.

Tab. 49: Jackknifed-Klassifikation der Diskriminanzanalysen für die Nadelspiegelwerte im Untersuchungszeitraum 1980-1984. Experiment WAL 234

a) Gesamtelementkonstellation (Mikro- und Makroelemente)

Gruppe	% korrekte	KON	VOLL	LUP
KON	100.0	3	0	0
VOLL	66.7	0	2	1
LUP	33.3	0	2	1
TOTAL	66.7	3	4	2

b) Makronährelemente (N, P, K, Ca, Mg)

Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP
KON	100.0	3	0	0
VOLL	66.7	0	2	1
LUP	33.3	0	2	1
TOTAL	66.7	3	4	2

c) Mikronährelemente (Fe, Mn, Zn, Cu, Al)

Gruppe	% korrekt	KON	VOLL	LUP
KON	66.7	2	1	0
VOLL	0.0	2	0	1
LUP	100.0	0	0	3
TOTAL	55.6	4	0	4

Siehe auch Abb. 41 b, c.

Abb. 41a: Schrittweise Diskriminanzanalyse: Beziehungen zwischen den ersten beiden kanonischen Variablen und den Gruppennittelwerten (Prüfglieder) für die Nährelementspiegelwerte in den Kiefernnadeln. Versuch WAL 234

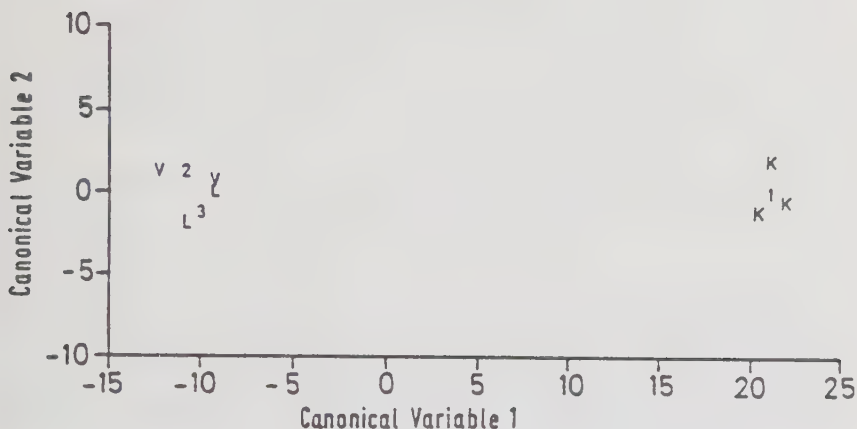


Abb. 41b: Schrittweise Diskriminanzanalyse: Beziehungen zwischen den ersten beiden kanonischen Variablen und den Gruppennittelwerten (Prüfglieder) für die Makronährelementspiegelwerte in den Kiefernnadeln. Versuch WAL 234

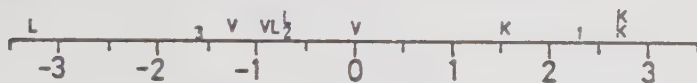
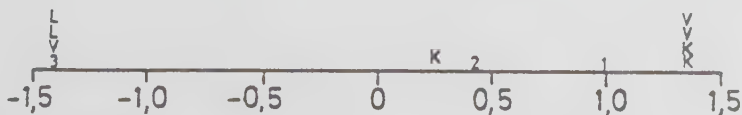


Abb. 41c: Schrittweise Diskriminanzanalyse: Beziehungen zwischen den ersten beiden kanonischen Variablen und den Gruppennittelwerten (Prüfglieder) für die Mikronährelementspiegelwerte in den Kiefernnadeln. Versuch WAL 234



9.10 Zusammenfassung - Kurze Bewertung der Methoden

Für die Gesamtaufschluß-Methode wurde nachgewiesen, daß die Prüfvarianten des Versuchs WAL 234 mit Hilfe der totalen Gehalte an C, N, P, K, Na, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu, Al und der pH-Werte in der organischen Auflage und in 0-10 cm Bodentiefe vollkommen korrekt getrennt wurden. Im unteren Bodenbereich gehen die Zuordnungsquoten dagegen auf 78 % (10-20 cm) und 33 % (20-30 cm) stark zurück, da die Wirkungen der Meliorationseingriffe auf die Gesamtelementgehalte zum Unterboden hin stark nachlassen.

Die diskriminanzanalytische Überprüfung der beiden KAK-Methoden ergab, daß das Schüttelextraktverfahren gewöhnlich zu einer schärferen Trennung der Versuchsvarianten führte als das Perkolationsverfahren.

Die Elementkonzentrationen in der GBL ermöglichten im April und Oktober meist nur eine unbefriedigende Zuordnung der Parzellen zu den Versuchsvarianten; nur mit den Analysendaten des Juli-Termins war eine bessere Differenzierung möglich. Die Untersuchung der Wasserextrakte dagegen lieferte für jeden geprüften Termin Kennwerte, die in der Diskriminanzanalyse zu einer überlegenen Zuordnungsquote führten.

10. Überprüfung der boden- und nadelanalytischen Daten auf ihre Eignung als Kennwerte der Bodenfruchtbarkeit im Versuch WAL 234

Für die Überprüfung der Beziehungen zwischen den bodenchemischen Kennwerten einerseits und den Zuwachs- und Ernährungsverhältnissen andererseits werden im Folgenden die Ergebnisse der Nadelanalysen (aus PREUHSLER und REHFUESS, 1982) sowie die ertragskundlichen Parameter (Exkursionsführer 1984) der Versuchsbestände zusammengestellt und benützt. Dabei werden auch die Daten für den Zeitraum 1980-1984 des Versuchs WAL 234 berücksichtigt. Mit Hilfe einer mehrfachen Regressionsanalyse (Programm 1R BMDP 1983) errechnete ich die Beziehungen zwischen dem Volumenzuwachs bzw. den N- und Ca-Spiegelwerten in den Nadeln (y-Variable) und sämtlichen erfaßten Bodenparametern (x-Variable; getrennt nach Methode). Überprüft wurden diejenigen Bodentiefen, in denen laut Varianzanalyse für die einzelnen Prüfglieder des Versuchs gesicherte Differenzen auftraten. Es wurden bestimmte Bodenparameter mit hohem Indikatorwert ausgewählt, um die Ergebnisse der verschiedenen Methoden miteinander vergleichen zu können. Auf das Einbeziehen von Variablen wie Na, K und Mn dagegen verzichtete ich, da sie sich als statistisch unbedeutend herausstellten.

10.1 Ernährungszustand der Kiefernbestände

10.1.1 Stickstoff- und Phosphor-Spiegelwerte

Tab. 50 faßt die N- und P-Gehalte halbjähriger Kiefernadeln für die Untersuchungszeiträume 1964-1979 und 1980-1984 zusammen.

Die durchschnittlichen N- und P-Spiegelwerte der Kiefern auf der Volldüngungsvariante in der Periode 1964-1979 sind im Vergleich zu den Kiefer-Kontrollwerten deutlich, aber nicht signifikant angestiegen. Sie lagen im Bereich einer ausreichenden bis guten Versorgung (vgl. FIEDLER, 1973; KREUTZER, 1980). Die bislang überlegene Wachstumsleistung dieser Meliorationsvariante ist darin begründet. Auch im Untersuchungszeitraum 1980-1984 war die N- und P-Ernährung der Volldüngungsvariante besser als jene der Kontrollbestände. Signifikante Unterschiede waren jedoch wiederum nicht festzustellen.

Abweichend verhielten sich die Kiefern der Versuchsvariante "Lupinenunterbau" in der Periode 1964-1979. Wegen gravierender Wurzelverletzungen durch das Fräsen verharrten ihre N- und P-Spiegelwerte zunächst auf dem niedrigen Niveau der Kontrollbestände im Mangelbereich; entsprechend verringerte sich auch der Zuwachs. Erst nach einer Verzögerung von rund 6 Jahren stiegen die N- und P-Spiegelwerte deutlich an und übertrafen seit 1975 mehrfach die Gehalte der Kiefernadeln auf der Volldüngungsvariante; der jährliche Zuwachs beschleunigte sich. Im Untersuchungszeitraum 1980-1984 lagen die P- und vor allem die N-Spiegel der mit Lupine unterbauten Kiefern deshalb deutlich über den Vergleichswerten für die vorhergehende Periode.

10.1.2 Kalium-, Calcium- und Magnesium-Ernährung

In Tab. 51 sind die K-, Ca- und Mg-Gehalte halbjähriger Kiefernadeln (mg/g Trockenmasse) für die Untersuchungszeiträume 1964-1979 und 1980-1984 zusammengestellt.

Als Folge der Ca- und Mg-Düngung nahmen die Ca- und Mg-Spiegelwerte der Kiefern in der Periode 1964-1979 auf den meliorierten Flächen eindeutig zu. Sie lagen in einem Bereich, der als optimal zu bezeichnen ist, während die Ca- und Mg-Gehalte in den Nadeln der Kontrollkiefern auf latenten Mangel schließen lassen. Die Kaliumernährung war in derselben Periode dagegen für alle Prüfglieder optimal.

Im Untersuchungszeitraum 1980-1984 übertrafen die Mg- und Ca-Spiegel der Kiefern auf den meliorierten Parzellen die Vergleichswerte ebenfalls deutlich, während für Kalium zwischen den Versuchsgliedern erneut keine signifikanten Differenzen auftraten.

Für das Jahr 1984 zeichnet sich im Vergleich zu anderen Jahren eine ungünstigere N-, K-, Ca- und Mg-Versorgung für alle Meliorationsvarianten ab, während die P-Gehalte relativ hoch lagen.

10.1.3 Mikronährelement-Versorgung

Die durchschnittlichen Spiegelwerte von Mn, Fe, Zn und Cu sowie Al in den Kiefernadeln wurden für den Untersuchungszeitraum 1980-1984

Tab. 50: Stickstoff- und Phosphorgehalte halbjähriger Kiefern-
nadeln (mg/g Nadeltrockenmasse) im Versuch WAL 234
(* PREUHSLER und REHFUESS, 1982 sowie REHFUESS 1986,
pers. Mitt.).

(Durchschnittswerte mit verschiedenen Buchstaben
unterscheiden sich signifikant)

Jahr	Stickstoff			Phosphor		
	KON	VOLL	LUP	KON	VOLL	LUP
1980	14.6	14.3	15.7	1.68	1.60	1.74
1981	15.6	17.4	17.1	1.56	1.56	1.68
1982	16.1	16.6	17.9	1.64	1.74	1.78
1983	14.8	15.9	17.0	1.57	1.60	1.67
1984	13.8	14.1	15.1	1.66	1.75	1.85
1980-1984	15.1a	15.7ab	16.6b	1.62a	1.66a	1.74a
1964-1979 (*)	15.0a	16.3a	13.7a	1.72a	1.77a	1.56b

Tab. 51: Kalium-, Calcium- und Magnesiumgehalte halbjähriger
Kiefern nadeln (mg/g) im Versuch WAL 234 (* PREUHSLER
und REHFUESS, 1982 sowie REHFUESS 1986, pers. Mitt.).
(Durchschnittswerte mit verschiedenen Buchstaben
unterscheiden sich signifikant)

Jahr	Calcium			Magnesium			Kalium		
	KON	VOLL	LUP	KON	VOLL	LUP	KON	VOLL	LUP
1980	1.96	2.46	2.33	0.66	0.80	0.73	5.34	4.83	4.69
1981	1.96	2.71	2.40	0.71	0.86	0.80	5.79	5.45	5.49
1982	1.95	2.68	2.63	0.81	0.85	0.83	6.26	5.95	6.11
1983	1.94	2.72	2.84	0.82	0.82	0.87	6.60	5.98	6.01
1984	1.67	2.04	2.40	0.67	0.69	0.77	5.84	5.37	5.41
1980-1984	2.24a	2.76b	3.06b	0.63a	0.80a	0.75a	5.96a	5.76a	5.69a
1964-1979 (*)	2.23a	2.82b	3.02c	0.67a	0.70ab	0.81b	5.90a	5.91a	5.73a

Tab. 52: Bestandskennwerte für den Versuch WAL 234

Kiefer (Pinus silv.), Alter im Herbst 1983: 103 Jahre,
Höhenbonität IV,0-III,5 (WIEDEMANN, 1943, m. Df.)
(PREUHSLEER et al., 1984)

Parameter	KON	VOLL	LUP
N/ha	703.0	708.0	708.0
dg (cm)	20.8	21.5	21.5
hg (m)	18.5	19.3	19.1
do (cm)	28.5	29.1	28.3
ho (m)	20.7	21.3	21.0
g (m2/ha)	32.3	35.9	35.0
v (Vfms/ha)	263.0	305.7	293.3

Tab. 53: Durchschnittlicher jährlicher laufender Zuwachs an
Schaftholz (Vfms) und relative Volumenzuwächse in
den Untersuchungsjahren (20) im Versuch WAL 234

WAL 234		Zuwachsperiode					
		1964-67	1967-69	1969-74	1974-78	1978-1983	x/Jahr
Vfms	KON	4.33	7.80	8.57	6.24	7.30	6.99
	VOLL	6.57	11.60	9.97	9.84	7.98	9.05
	LUP	4.17	8.23	10.22	9.48	8.72	8.50
Iv%	KON	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	VOLL	152.0	149.7	116.3	158.7	109.3	129.5
	LUP	96.4	105.5	119.3	150.9	119.5	121.6

ebenfalls ermittelt. Unterschiede zwischen den Prüfgliedern traten nicht auf; die Gehalte variierten im üblichen Rahmen (vgl. FIEDLER, 1973).

10.2 Ertragskundliche Ergebnisse

10.2.1 Kennwerte des verbleibenden Bestands 1983

Tab. 52 informiert über die Bestandeskennwerte für den Versuch WAL 234 im Herbst 1983.

10.2.2 Volumenzuwachs

Tab. 53 zeigt den durchschnittlichen jährlichen, laufenden Zuwachs für die einzelnen Zuwachsperioden.

In den ersten beiden Perioden reagierten die Kiefern auf den Voll-düngungspartzellen mit einem kräftigen Zuwachsanstieg (52 bzw. 49 %), während die Versuchsvariante Lupine im selben Zeitraum sich von dem Versuchsglied Kontrolle nicht unterschied. Erst ab der 3. Periode reagierten die Kiefern auf den Lupinenunterbau und holten im Zuwachs beträchtlich auf. In der 5. Kontrollperiode waren sie schließlich den vollgedüngten Kiefern gegenüber deutlich überlegen.

10.3 Korrelationsanalytische Überprüfung der bodenanalytischen Kennwerte

10.3.1 Kennwerte des Gesamtaufschlusses

Die Matrizen der einfachen Korrelationskoeffizienten für den Auflagehumus und die Bodenlage 0-10 cm sind in Tab. 54 (a, b) zusammengestellt.

Die Ca-Gehalte in der organischen Auflage waren mit den pH-CaCl₂-Werten, den Mg- und P-Gehalten sowie in der Bodentiefe 0-10 cm mit den C- und N-Gehalten positiv gekoppelt. Die Mg-Gehalte korrelierten mit den pH-CaCl₂-Werten, den N- und P-Gehalten lediglich in der

organischen Auflage. Die C-Gehalte im Auflagehumus waren dagegen mit allen anderen genannten Kennwerten zumindest als Trend negativ korreliert. Erklärbar ist dies sicherlich mit den niedrigen C-Gehalten auf den meliorierten Flächen. In 0-10 cm Tiefe korrelierten die C-Gehalte dagegen nur noch signifikant positiv mit den N-Gehalten.

10.3.2 KAK-Kennwerte

Die Korrelationskoeffizienten für sämtliche Beziehungen zwischen den Parametern der Perkulations- und Schüttelextraktmethode sind in Tab. 55 (a, b, c, d) für den Auflagehumus und die Bodentiefe 0-10 cm zusammengestellt.

Gesicherte Zusammenhänge zwischen den austauschbaren bzw. extrahierbaren Gehalten nach Perkolation und Schüttelextraktion zeigten sich in der organischen Auflage für H, Al, Fe, Ca und Mg in der Weise, daß nach beiden Verfahren die Gehalte von H, Al und Fe miteinander positiv, mit Ca und Mg jedoch negativ korrelierten. In der Bodenlage 0-10 cm waren nur die Al-Gehalte (Schüttelextrakt) signifikant negativ mit Ca und Mg gekoppelt. Beide Verfahren spiegeln aber einen engen Zusammenhang zwischen den Ca- und Mg-Gehalten in dieser Bodenebene wider.

10.3.3 Kennwerte der Bodenlösung (GBL/WE)

Tab. 56 (a, b) informiert über die Korrelationsmatrizen der GBL- und WE-Parameter für die Tiefenstufe 0-10 cm.

In der GBL waren alle Parameter miteinander positiv signifikant gekoppelt. Die Korrelationsergebnisse für den pH mit den Ca- und Mg-Gehalten sind eindeutig zu interpretieren (Tab. 56 a).

Im WE (vergl. Tab. 56 b) waren die Ca-Konzentrationen positiv signifikant mit den pH-Werten bzw. negativ mit den Fe-Gehalten korreliert. Für die Al-Konzentrationen im WE ließen sich keine gesicherten Abhängigkeiten nachweisen. Mg und Ca im WE variierten gleichsinnig. Der positive Zusammenhang zwischen Ca und dem pH-Wert ist wie bei der GBL gut erklärbar.

est. 54: Matrix der einfachen Korrelationskoeffizienten für die Interkorrelationen zwischen den Gesamtelementgehalten in der org. Auflage und in der Bodentiefe 0-10 cm im Experiment WAL 234. (n = 9) //

a) org. Auflage

Parameter	Al	Fe	Ca	Mg	C-org.	Nt	Pt	pH-CaCl ₂
Al	1,00							
Fe	0,95***	1,00						
Ca	0,42	0,40	1,00					
Mg	0,77**	0,82***	0,82***	1,00				
C-org.	-0,93***	-0,88**	-0,43	-0,74*	1,00			
Nt	0,35	0,46	0,55	0,67*	-0,28	1,00		
Pt	0,86**	0,88**	0,73*	0,98***	-0,83**	0,66*	1,00	
pH-CaCl ₂	0,68*	0,69*	0,92***	0,96***	-0,68*	0,63	0,93***	1,00

b) Mineralboden 0-10 cm

Parameter	Al	Fe	Ca	Mg	C-org.	Nt	Pt	pH-CaCl ₂
Al	1,00							
Fe	0,45	1,00						
Ca	0,16	0,18	1,00					
Mg	0,82**	0,55	0,03	1,00				
C-org.	0,00	-0,09	0,77*	-0,18	1,00			
Nt	0,09	0,13	0,87**	-0,04	0,95***	1,00		
Pt	0,60	0,66	0,59	0,58	0,34	0,54	1,00	
pH-CaCl ₂	0,17	-0,01	0,61	-0,14	-0,61	0,71*	0,53	1,00

// Zufallsstichwerte von r für 7 fG: P = 0,05; 0,01; 0,001; r = 0,6664* ; 0,7977** ; 0,8983***

Tab. 55: Matrix der einfachen Korrelationskoeffizienten für die Interkorrelationen zwischen den Kennwerten der KAK in der organischen Auflage und in der Bodentiefe 0-10 cm. Experiment WAL 234 (n = 9) //

a) KAK-Perkolationsmethode (org. Auflage)

Parameter	H	Al	Fe	Ca	Mg
H	1,00				
Al	0,98***	1,00			
Fe	0,97***	0,97***	1,00		
Ca	-0,96***	-0,96***	-0,93***	1,00	
Mg	-0,77*	-0,78*	-0,81**	0,65	1,00

b) KAK-Schüttel-extraktmethode (org. Auflage)

Parameter	H	Al	Fe	Ca	Mg
H	1,00				
Al	0,97***	1,00			
Fe	0,96***	0,96***	1,00		
Ca	-0,93***	-0,92***	-0,94***	1,00	
Mg	-0,72*	-0,75*	-0,78**	0,54	1,00

c) KAK-Perkolationsmethode (0-10cm)

Parameter	H	Al	Fe	Ca	Mg
H	1,00				
Al	0,65	1,00			
Fe	0,32	0,33	1,00		
Ca	0,41	-0,04	0,13	1,00	
Mg	0,69*	0,31	0,20	0,87*	1,00

d) KAK-Schüttel-extraktmethode (0-10cm)

Parameter	H	Al	Fe	Ca	Mg
H	1,00				
Al	0,45	1,00			
Fe	0,28	0,57	1,00		
Ca	-0,60	-0,91***	-0,54	1,00	
Mg	-0,46	-0,96***	-0,41	0,93***	1,00

#Zufallshöchstwerte von r für 7 FG: P = 0,05; 0,01; 0,001;
r = 0,6664* ; 0,7977** ; 0,8983***

Tab. 56: Matrix der einfachen Korrelationskoeffizienten für die Interkorrelationen zwischen den Kennwerten der Bodenlösung in der Bodentiefe 0-10 cm. Experiment WAL 234. (n = 9) //

a) GBL

Parameter	pH-GBL	Al	Fe	Ca	Mg
pH-GBL	1,00				
Al	0,89**	1,00			
Fe	0,91***	0,96***	1,00		
Ca	0,85**	0,69*	0,76*	1,00	
Mg	0,91***	0,84**	0,82**	0,65	1,00

b) WE

Parameter	pH-WE	Al	Fe	Ca	Mg
pH-WE	1,00				
Al	-0,43	1,00			
Fe	-0,92***	0,24	1,00		
Ca	0,85**	-0,02	-0,91***	1,00	
Mg	-0,49	-0,34	-0,72*	0,84**	1,00

#Zufallshöchstwerte von r für 7 FG: P = 0,05; 0,01; 0,001;
r = 0,6664* ; 0,7977** ; 0,8983***

Tab. 57: Matrix der einfachen Korrelationskoeffizienten für die Beziehungen zwischen nadelanalytischen Kennwerten und dem Volumenzuwachs (LZW) im Experiment WAL 234. (Untersuchungszeitraum 1980-1984; n = 9) //

Parameter	Al	Fe	Ca	Mg	N	P	LZW
Al	1,00						
Fe	0,30	1,00					
Ca	0,33	0,21	1,00				
Mg	0,49	0,19	0,84**	1,00			
N	0,05	0,52	0,73*	0,46	1,00		
P	0,11	0,30	0,66*	0,50	0,87**	1,00	
LZW	-0,46	0,50	0,19	0,07	0,42	0,28	1,00

#Zufallshöchstwerte von r für 7 FG: P = 0,05; 0,01; 0,001;
r = 0,6664* ; 0,7977** ; 0,8983***

10.4 Beziehungen zwischen dem Volumenzuwachs und dem Ernährungszustand

Tab. 57 enthält die Matrix der einfachen Korrelationskoeffizienten für beide Parametersätze. Gesicherte Zusammenhänge zwischen Volumenzuwachs und Ernährungszustand waren nicht nachweisbar. Für den Untersuchungszeitraum zeigte sich lediglich ein tendenzieller positiver Zusammenhang mit den N-Gehalten der Nadeln. Für die nadelanalytischen Kennwerte ergaben sich jedoch enge Interkorrelationen zwischen Ca und Mg sowie N und P.

10.5 Beziehungen zwischen Volumenzuwachs und bodenanalytischen Kennwerten

In Tab. 58 sind die einfachen Korrelationskoeffizienten für die Beziehungen zwischen Volumenzuwachs (y-Variable) und den Kennwerten nach den einzelnen bodenchemischen Verfahren (x-Variable) zusammengestellt. Es werden für sämtliche Gleichungen ihr Bestimmtheitsmaß (B), ihre multiplen Korrelationskoeffizienten (R) sowie der Signifikanzgrad des F-Tests mitgeteilt.

10.5.1 Kennwerte des Gesamtaufschlusses

Für beide Bodenlagen besteht praktisch kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Volumenzuwachs und den Kennwerten des Gesamtaufschlußverfahrens (Ausnahme Fe). Positive Korrelationen deuten sich jedoch an für die pH-Werte und die Gehalte von Ca, N, P und Mg insbesondere in der organischen Auflage.

10.5.2 Kennwerte der KAK

Beide Verfahren weisen für die organische Auflage eine negative Korrelation des Volumenzuwachses zu den H-, Al-, Fe-Gehalten und eine positive zu den Ca- und Mg-Gehalten nach, die jedoch nicht signifikant sind. Das Schüttelextraktverfahren zeigt darüberhinaus gleichsinnige Abhängigkeiten auch für den Mineralboden von 0-10 cm

Tiefe, hat also auch insofern einen besseren Indikatorwert. Dies kommt auch dadurch zum Ausdruck, daß die Schüttelextraktmethode viel höhere Bestimmtheitsmaße lieferte als das Perkolationsverfahren.

10.5.3 Beziehungen zwischen dem Volumenzuwachs und den Kennwerten der Bodenlösungen

Die engsten Korrelationen bestehen zwischen den pH-Werten beider Lösungen bzw. den Mg-Gehalten in der GEL und der Zuwachsleistung. Der multiple Regressionskoeffizient für das WE-Verfahren übertrifft jenen der Funktion für die Parameter der GBL.

Die positiv signifikante Korrelation zwischen der Al- bzw. Fe-Konzentration der GEL und dem Zuwachs läßt sich mit dem stärkeren Auftreten von komplexierten Bindungsformen beider Elemente in der GEL der meliorierten Flächen erklären. Im WE sind Al und Fe dagegen negativ mit dem periodischen Zuwachs gekoppelt.

10.6 Beziehungen zwischen den Nährelementspiegelwerten in den Kiefernadeln und den bodenanalytischen Kennwerten

In den Tab. 59 und 60 sind die einfachen Korrelationskoeffizienten für die getrennt errechneten Beziehungen zwischen mittleren N- und Ca-Nährelementgehalten (y-Var.) in Abhängigkeit von den bodenchemischen Kennwerten (x-Var.) aufgeführt. Zusätzlich sind das multiple Bestimmtheitsmaß (B), die Korrelationskoeffizienten (R) sowie Signifikanzgrad der F-Werte für sämtliche Gleichungen angegeben.

10.6.1 Beziehungen zwischen N in den Kiefernadeln und den bodenanalytischen Kennwerten

10.6.1.1 Kennwerte des Gesamtaufschlußverfahrens

Die N-Spiegelwerte der Kiefern sind mit dem pH-Wert und den Gesamtgehalten der organischen Auflage an P, Al und Fe signifikant positiv, mit den C-Gehalten dagegen negativ korreliert. Dieser Zusammenhang ist verständlich, da der günstigere Auflagehumus der meliorier-

Tab. 58: Kennwerte einiger multiplen linearen Regressionen für die Beziehungen: LZW (y-Var.) in Abhängigkeit von bodenanalytischen Parametern (x-Var.) im Experiment WAL 234. (Erhebung 1980-1984)

Methode	Boden- tiefe (cm)	Korrelationskoeffizienten										R	F-Test
		pH CaCl ₂	G- org.	Nt	Pl	H	Al	Fe	Ca	Mg	B		
Gesamtaufschluß	org. Aufl.	0,47	-0,48	0,44	0,57	-	0,58	0,68*	0,33	0,59	0,85	0,92	n.s.
	0-10	0,50	0,03	0,17	0,01	-	-0,42	0,06	0,15	-0,32	0,91	0,95	n.s.
KAK-Perkolat	org. Aufl.	-	-	-	-	-0,47	-0,47	-0,40	0,38	0,53	0,57	0,75	n.s.
	0-10	-	-	-	-	-0,05	0,06	0,06	0,36	0,17	0,49	0,70	n.s.
KAK-Schlütlext.	org. Aufl.	-	-	-	-	-0,50	-0,43	-0,48	0,42	-0,60	0,83	0,91	n.s.
	0-10	-	-	-	-	-0,73*	-0,38	-0,55	0,36	0,33	0,91	0,95	n.s.
GBL	0-10	0,55	-	-	-	-0,59	0,39	0,44	0,46	0,59	0,44	0,66	n.s.
	0-10	0,63	-	-	-	-0,60	-0,51	-0,60	0,36	0,07	0,72	0,85	n.s.

B = multiples Bestimmtheitsmaß; R = multipler Korrelationskoeffizient; F-Test der Regression; n-9.

Zufallsnächstwerte von r für 1 f.d.; p = 0,05; 0,01; 0,001; r = 0,6664* ; 0,7971** ; 0,8981***

Tab. 59: Kennwerte einiger multiplen linearen Regressionen für die Beziehungen: N-Spiegelwerte (y-Var.) in Abhängigkeit von bodenanalytischen Parametern (x-Var.) im Experiment WÄL 234. (Erhebung 1980-1984)

Methode	Boden- tiefe (cm)	Korrelationskoeffizienten										B	R	F-Test
		pH CaCl ₂	G- org.	Nt	Pt	H	Al	Fe	Ca	Mg				
Gesamtaufschluß	org. Aufl.	0,61	-0,96**	0,25	0,74**	-	0,85*	0,79*	0,38	0,64	0,97	0,98	n.s.	
	0-10	0,82**	0,68*	0,76*	0,52	-	-0,12	0,01	0,74*	-0,18	0,85	0,92	n.s.	
KAK-Perkolat	org. Aufl.	-	-	-	-	-0,61	-0,64	-0,69*	0,47	0,72*	0,78	0,87	n.s.	
	0-10	-	-	-	-	-0,02	-0,14	0,20	0,69*	0,59	0,76	0,88	n.s.	
KAK-Schlüßtext.	org. Aufl.	-	-	-	-	-0,64	-0,59	-0,55	0,40	0,62	0,73	0,85	n.s.	
	0-10	-	-	-	-	-0,47	-0,74*	-0,46	0,83**	0,77*	0,70	0,83	n.s.	
GBL	0-10	0,85**	-	-	-	-0,78*	0,66*	0,69*	0,66*	0,79*	0,89	0,94	n.s.	
	2:1 Wassertext.	0-10	0,78*	-	-	-0,75*	-0,49	-0,83**	0,70*	0,58	0,94	0,97	*	

B = multiples Bestimmtheitsmaß; R = multipler Korrelationskoeffizient; F-Test der Regression; n=9.

Zufallshöchstwerte von r für 7 FG: P = 0,05; 0,01; 0,001; r = 0,6661* ; 0,7977** ; 0,8983***

Tab. 60: Kennwerte einiger multiplen linearen Regressionen für die Beziehungen:
Ca-Spiegelwerte (y-Var.) in Abhängigkeit von bodenanalytischen Parametern (x-Var.)
im Experiment WAL 234. (Erhebung 1980-1984)

Methode	Boden- tiefe (cm)	Korrelationskoeffizienten										B	R	F-Test
		pH CaCl2	C- org.	Nt	Pt	H	Al	Fe	Ca	Hg				
Gesamtaufschluß	org. Aufl.	0,84 (**)	-0,76 (*)	0,49 (**)	0,84 (**)	-	0,73 (*)	0,62 (*)	0,76 (*)	0,78 (*)	0,98	0,99	n.s.	
	0-10	0,91 (***)	0,64	0,66 (*)	0,41	-	-0,25	-0,20	0,56	-0,20	0,96	0,98	n.s.	
KAK-Perkolat	org. Aufl.	-	-	-	-	-0,86 (**)	-0,88 (**)	-0,92 (**)	0,81 (**)	0,64	0,96	0,98	*	
	0-10	-	-	-	-	-0,01	-0,35	0,01	0,83 (**)	0,64	0,90	0,95	n.s.	
KAK-Schüttelfest.	org. Aufl.	-	-	-	-	-0,87 (**)	-0,85 (**)	-0,77 (*)	0,75 (*)	0,51	0,97	0,98	*	
	0-10	-	-	-	-	-0,46	-0,75 (*)	-0,57 (*)	0,89 (**)	0,73	0,93	0,96	*	
GBL	0-10	0,83 (**)	-	-	-	-0,84 (**)	0,88 (**)	0,90 (**)	0,71 (*)	0,62	0,95	0,97	*	
2:1 Wasserext.	0-10	0,78 (*)	-	-	-	-0,83 (**)	-0,44	-0,68	0,74 (*)	0,42	0,81	0,90	n.s.	

B = multiples Bestimmtheitsmaß; R = multipler Korrelationskoeffizient; F-Test der Regression; n.g.
Zufallshöchstwerte von r für 7 FG: P = 0,05; 0,01; 0,001; r = 0,6664* ; 0,7977** ; 0,8983***

ten Parzellen eine verbesserte Reaktion, höhere P-Anteile und auch mehr Mineralbodenbeimischung (damit auch mehr Gesamt-Al und -Fe) aufweist als der Rohhumus der Kontrollparzellen.

Die pH-Werte, die C-, N- und Ca-Gehalte der Bodenlage 0-10 cm sind mit N in den Nadeln ebenfalls signifikant positiv gekoppelt.

10.6.1.2 Kennwerte der KAK

Die N-Spiegelwerte der Kiefern sind mit den Gehalten an austauschbarem Ca und Mg in Auflage und Mineralboden (teils signifikant) positiv, mit jenen an Fe und Al durchweg negativ verknüpft.

10.6.1.3 Kennwerte der Bodenlösung

Die Korrelationen zwischen den N-Spiegelwerten und dem pH-Wert sowie den Al-, Fe-, Ca- und Mg-Konzentrationen in der GEL waren durchweg positiv; von den Parametern des WE variieren die Ca- und Mg-Konzentrationen sowie der pH-Wert erwartungsgemäß durchweg gleichsinnig, die Al- und Fe-Konzentrationen dagegen gegenläufig mit den bzw. zu den N-Gehalten in den Kiefernadeln.

10.6.2 Beziehungen zwischen Ca in den Kiefernadeln und den bodenanalytischen Kennwerten

10.6.2.1 Kennwerte des Gesamtaufschlußverfahrens

Tab. 60 zeigt die engen Zusammenhänge zwischen den Ca-Spiegelwerten der Kiefern und den pH-Werten in beiden Bodenlagen sowie den C-, P-, Al-, Ca- und Mg-Gesamtgehalten der org. Auflage. Zur Begründung verweise ich auf die Ausführungen über die N-Ernährung (Kap. 5).

10.6.2.2 Kennwerte der KAK-Bestimmungsmethoden

Gesicherte und ökologisch verständliche Zusammenhänge zwischen der Ca-Versorgung der Kiefern und den austauschbaren bzw. extrahierbaren

Gehalten an Kationen zeigten sich für die organische Auflage für H, Al und Fe (negativ) sowie für Ca und Mg (positiv). Dagegen lieferte für die Tiefenstufe 0-10 cm nur das Schüttelextraktverfahren gleichgerichtete Korrelationen.

10.6.2.3 Kennwerte der Bodenlösung

Von den Kennwerten der GBL und des WE sind die H-Konzentrationen negativ, die Ca-Konzentrationen signifikant positiv mit den Ca-Spiegelwerten in den Nadeln korreliert. Die positive Abhängigkeit von den Al- und Fe-Konzentrationen der GBL erstaunt zwar, beruht jedoch auf der Anwesenheit von viel Al und Fe in wahrscheinlich komplexierter Form in der Lösung der meliorierten Flächen. Die Ergebnisse des WE-Verfahrens liefern dagegen die erwartete negative Beziehung zwischen beiden Metallen und der Ca-Ernährung der Kiefern.

11. Diskussion

11.1 Bewertung der Analysenverfahren im Hinblick auf ihre Eignung zur Erfassung von Meliorationseffekten

11.1.1 Gesamtaufschlußverfahren

Das Gesamtaufschlußverfahren erfaßte die meliorationsbedingten Veränderungen der Gehalte und Vorräte an Basen-Kationen recht gut. Die mit dieser Methode festgestellten Reaktionen in den verschiedenen Horizonten auf Meliorationsmaßnahmen wurden gewöhnlich durch die KAK- und GEL/WE-Verfahren vor allem für Ca und Mg bestätigt. Über die Verfügbarkeit der Elemente ist jedoch anhand der Gesamtgehalte keine Aussage möglich, weil auch die in schwer aufschließbaren Bindungsformen vorliegenden Fraktionen erfaßt werden (SCHLICHTING und BLUME, 1966). Die Gesamtgehalte und -vorräte an Fe, Mn und Al wurden dagegen durch die Meliorationsmaßnahmen nicht beeinflusst; ihre Bestimmung erwies sich als überflüssig im Hinblick auf die Kennzeichnung der Meliorationseffekte.

Aus den Ergebnissen der Diskriminanzanalyse für den Versuch WAL 234 läßt sich ableiten, daß die Gesamtaufschlußmethode unter Berücksichtigung aller Parameter lediglich in der organischen Auflage und in der Bodentiefe 0-10 cm eine vollständig korrekte Zuordnung der Parzellen zu den verschiedenen Prüfgliedern ermöglicht. Im unteren Mineralbodenbereich 10-30 cm geht die Diskriminierung deutlich zurück, und die Streuung um den Versuchsgliedmittelwert nimmt zu. Dieser Befund beruht vorwiegend auf dem Umstand, daß die Meliorationsmaßnahmen sich im Oberboden viel stärker auf die Gesamtgehalte an Ca und Mg auswirkten als im tieferen Mineralboden.

11.1.2 KAK-Bestimmungsmethoden

In der folgenden Tabelle sind zunächst die wesentlichen Merkmale der beiden Methoden zur Bestimmung der KAK aufgeführt.

Tab. 61: Hauptmerkmale der beiden KAK-Bestimmungsmethoden

Verfahren :	Perkolaton	Schüttelextraktion
Lösungsmenge	250 ml	100 ml
Molarität	1 M	0,5 M
Bodeneinwaage	5 g Auflagehumus 10 g Mineralboden	1,25 g Auflagehumus 2,50 g Mineralboden
Dauer der Extraktion	1 h vertikal	1 h horizontal
Zentrifugation	-	30 min.

- Vergleich zwischen den Gehalten an austauschbaren Kationen

Die H-Gehalte in der organischen Auflage unterscheiden sich in der Regel nach beiden Verfahren nicht; im Mineralboden dagegen werden sie nach dem Schüttelextraktverfahren wesentlich höher eingeschätzt als nach der Perkolationsmethode, weil durch das Schütteln offensichtlich mehr H-Ionen freigesetzt wurden als durch Perkolaton. Hinzu kommt, daß bei der Perkolationsmethode in der Blindlösung pH-Varia-tionen zwischen 4,2 und 5,0 auftraten.

Die Fe- und Al-Gehalte liegen im Trend nach Perkolaton höher als nach Schüttelextraktion. Die Unterschiede sind jedoch aufgrund der hohen Streuung (vor allem bei Perkolaton) sowie wegen geringer Freiheitsgrade (Versuch WAL 228) nur selten signifikant. Damit bestätigen sich die Ergebnisse der Voruntersuchungen (vgl. 4.1.1 c), wonach für die Bestimmung des austauschbaren Al und Fe mindestens eine Extraktion mit 250 ml notwendig ist, um einen vollständigen Austausch zu erreichen, während die größten Anteile von H, Na, K, Ca, Mg und Mn in der Regel bereits in den ersten 100 ml des Perkolats erscheinen. Auch MEIWES et al. (nachträgliches Protokoll, Bodenkundliche Tagung 1986) fanden bei ihren methodischen Überprüfungen für Al höhere Gehalte nach der Perkolationsmethode als nach dem Schüttelextraktverfahren, während die letztgenannte Methode im Gegensatz zu unseren Messungen höhere Fe-Gehalte lieferte. Die feste Bindung von Fe- und Al-Ionen im Boden beruht teilweise auf der Bildung stabiler organischer Komplexe (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 1973). Sie werden durch eine einmalige Extraktion/Schüttelung des Bodens nur teilweise und nur schwer re-produzierbar erfaßt.

Für Mn ergab sich dagegen nach beiden KAK-Methoden gute Übereinstimmung.

Beide Methoden der KAK-Bestimmung lieferten übereinstimmende Ergebnisse für Ca. Ca erreicht also als zweiwertiges Ion in dem verdünnten Lösungsmilieu von 0,5 M NH_4Cl annähernd denselben Austauschgrad wie in 1 M NH_4Cl -Lösung. Durch Schüttelextraktion bestimmte ich dagegen in den meisten Fällen höhere Werte für K und Na vor allem in der Auflage. Eine mögliche Erklärung für diese Tatsache ist, daß die austauschbaren einwertigen K- und Na-Ionen wegen ihrer geringen Bindungsstärke in einer 0,5 M NH_4Cl -Lösung stärker und schneller von den Austauschern verdrängt werden als durch die konzentriertere 1 M NH_4Cl .

Die Mg-Gehalte werden in der Regel nach dem Perkulationsverfahren in der organischen Auflage höher, im Mineralboden jedoch niedriger eingeschätzt als nach Schüttelextraktion, was z. T. auf der unterschiedlichen Perkulationszeit, z. T. auch auf höherer Streuung beruhen dürfte.

Für die Basensättigung ergaben sich nach beiden Methoden mehr oder weniger übereinstimmende Werte mit einer leichten, tendenziellen Überlegenheit nach Schüttelextraktion. Auch für die KAK lieferten beide Verfahren ähnliche Angaben.

Meine Ergebnisse decken sich gut mit den Beobachtungen von TRÜBY (nachträgliches Protokoll, Bodenkundliche Tagung 1986), der ungefähre Übereinstimmung zwischen beiden Methoden für die Kationen K, Ca und Mg sowie für die Basensättigung im Mineralboden nachwies. Auch MEIWES et al. (nachträgliches Protokoll, Bodenkundliche Tagung 1986) berichteten über ein Probenkollektiv mit verschiedenen Versauerungsgraden, für das beide Verfahren etwa gleiche Werte für die Kationen Na, K, Ca und Mg lieferten.

- Überprüfung der Meliorationswirkungen mit beiden Methoden der KAK-Bestimmung

Die Varianzanalysen für die Versuche WAL 234 und 228 sowie die gutachtliche Überprüfung der Ergebnisse aus den Experimenten Archenohe und Großdick zeigen, daß in den meisten Fällen sowohl die Perkulationsmethode als auch das Schüttelextraktverfahren die meliorationsbedingten Unterschiede gut identifizieren. Die Zahl der gesicherten Differenzen war praktisch identisch. Unterschiedlich war allerdings der Signifikanzgrad, was wahrscheinlich auf den meist etwas günstige-

ren Variationskoeffizienten der besser standardisierbaren Schüttel-extraktion beruhte. Dies führte zu einer schärferen Trennung der verschiedenen Versuchsvarianten in der Diskriminanzanalyse für den Versuch WAL 234 durch Verwenden der Analysenergebnisse aus dem letztge-nannten Bestimmungsgang. Die sehr unbefriedigende Zuordnung der Par-zellen anhand der Perkolationsdaten in der organischen Auflage und in der Tiefenstufe 20-30 cm beruhte wahrscheinlich auf großen Abwei-chungen in den Perkolationszeiten und damit erheblicher Analysen-streuung.

Insgesamt erwies sich die Schüttelextraktion als die für Serienana-lysen überlegene Methode.

11.1.3 Verfahren zur Analyse der Bodenlösung

Unter der GBL versteht man jene flüssige Phase des Bodens, die an-nähernd dem in größeren Poren perkolierenden Sickerwasser entspricht, während der Wasserextrakt als wässrige Phase einer Bodensuspension mit relativ weitem Wasser/Bodenverhältnis aufzufassen ist. Daher be-stehen sowohl in der Zielsetzung als auch in der Methodik selbst wesentliche Unterschiede zwischen GBL- und WE-Untersuchung. In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Unterschiede im Verfahrens-gang aufgeführt:

Tab. 62: Hauptmerkmale der beiden Verfahren zur Analyse der Bodenlösung

Verfahren:	GBL	WE
Art der Probe	Frisch	getrocknet
Boden/Lösungs-Verhältnis	0,8 ml/g	2 ml/g
Dauer der Gleich-gewichtseinstellung	24 h stehenlassen	24 h schütteln
Gewinnungsart der Lösung	Zentrifugation	Zentrifugation
Filtration	Absaugen 0,45 µm	Absaugen 0,45 µm

Bei der Bewertung beider Methoden ist einerseits die Störung der Bodenproben vor allem bei der Gewinnung des WE zu beachten. Anderer-

seits ist aufgrund der räumlichen und jahreszeitlichen Schwankungen mit starker Streuung der Elementkonzentrationen zu rechnen.

- Bewertung der jahreszeitlichen Variation

Über die saisonale Abhängigkeit der Elementkonzentrationen in GBL und WE lassen sich wegen der beschränkten Zahl der Entnahmetermine (3) und aufgrund der hohen Streuung der Durchschnittswerte (besonders bei der GBL) nur sehr grobe Aussagen machen. Hinzu kommt, daß die Bodenproben an jedem Untersuchungstermin an verschiedenen Stellen der 1 m^2 großen Entnahmeparzelle eingeholt werden mußten. So geht die beachtliche räumliche Variabilität vor allem bei den Versuchsgliedern mit Bodenbearbeitung (Lupine, Großdick, Erle) in die Überprüfung mit ein. Wahrscheinlich werden die jahreszeitlichen Effekte auch durch die verschiedenartige Vorbehandlung der Proben überlagert.

Nach den vorliegenden Ergebnissen beider Methoden ist die jahreszeitliche Abhängigkeit der Elementkonzentrationen überraschend klein. Diese Aussage ist jedoch mit Unsicherheiten behaftet, da die erwähnten Störfaktoren die Elementkonzentrationen entscheidend beeinflussen. Trotzdem ergeben sich aus diesem Befund keine Einschränkungen gegen die Verwendung der Bodenlösung zur Beurteilung der Auswirkungen von Meliorationsmaßnahmen auf den aktuellen chemischen Zustand des Bodens. Ein optimales Verfahren sollte natürlich nach einem langfristigen Konzept kontinuierliche Messungen über mehrere Jahre hinweg vorsehen, um die zeitliche Variabilität der Standorte präziser zu erfassen als dies in dieser Arbeit möglich war.

- Überprüfung der Meliorationseffekte auf GBL und WE

Die pH-Werte im WE variieren gewöhnlich auf einem niedrigeren Niveau als jene in der GBL. Die entsprechenden Tiefenfunktionen liegen allerdings mit zunehmender Bodentiefe immer näher beieinander. Dieser Befund gilt für alle Versuchsglieder und alle Termine. Erklären lassen sich diese Differenzen z. B. mit einer stärkeren Freisetzung von Säurekationen (insbesondere H^+) durch das Schütteln des Bodens bei der Gewinnung der WE. Eine weitere Ursache ist die hierfür eingesetzte große Wassermenge (Verdünnungseffekt), da bei abnehmendem Elektrolytgehalt der Außenlösung bevorzugt einwertige Kationen (H^+)

austauschen. Während die pH-Werte mit zunehmender Bodentiefe ansteigen, gehen in beiden Lösungen die Konzentrationen von Al und Fe zurück. Für Al und Fe in der GEL wurden überraschenderweise auf den Meliorationsvarianten regelmäßig höhere Konzentrationen als auf den Kiefern-Vergleichsflächen festgestellt; für den WE trifft in der Regel das Gegenteil zu. Erklärt wird dieser Befund mit einem höheren Komplexierungsgrad der Al- und Fe-Ionen in der GEL der meliorierten Flächen. NATSCHER und SCHWERMANN (1985) berichten von ähnlichen Beobachtungen in der organischen Auflage von Podsol-Braunerden aus Phyllit- und Granitschuttsubstrat im Fichtelgebirge. Ihre Gleichgewichtsbodenlösungen waren gelb bis braun gefärbt, und etwa 50-80 % des Gesamt-Al in der GEL lagen in nicht labiler Form vor. Trotz hoher Konzentration an Gesamt-Al war kein Al^{3+} in den Extrakten nachzuweisen. Angesichts dieser Ergebnisse stellt man sich die Frage, ob die Molverhältnisse von Ca/Al und Mg/Al in der GEL unter solchen Bedingungen (starke Komplexierung) ein Urteil erlauben über die Notwendigkeit einer Kalkung (vgl. MEIWES et al., 1984). Die Verwendung des Molverhältnisses Ca/H wird durch diese Überlegungen nicht beeinträchtigt; allerdings ist die Bestimmung der H^+ -Konzentration über den pH-Wert als Teil des Quotienten recht unsicher.

Aus meiner Untersuchung vor allem der GEL geht auch hervor, daß Analysen über die in der Lösung vorkommenden Al- und Fe-Spezies auch hinsichtlich ihrer ökologischen Bedeutung dringend geboten sind.

Meliorationsbedingte Veränderungen lassen sich auch für den pH-Wert sowie für die Konzentrationen von Ca und Mg in der GEL und im WE zu allen Jahreszeiten insbesondere im Oberboden nachweisen. Die Na-, K- und Mn-Konzentrationen wurden dagegen durch die Meliorationsmaßnahmen kaum beeinflusst.

Die Anionen-Konzentrationen in GEL und WE wurden durch die Meliorationsmaßnahmen kaum signifikant verändert. Im übrigen traten starke zeitliche Schwankungen sowie methodische Probleme auf, die die Meliorationseffekte überdecken. Die NO_3 -N-Konzentrationen lagen in der Regel unter der Nachweisgrenze. Aus den Ergebnissen der Diskriminanzanalyse für den Versuch WAL 234 geht hervor, daß Meliorationseffekte sowohl in der GEL als auch im WE erfaßt werden können. Insgesamt gelang jedoch mit der Analyse der Wasserextrakte eine bessere Zuordnung und Auftrennung der Versuchsvarianten, was wahrscheinlich auf höhere "Stabilität" des WE-Parameter zurückzuführen ist.

11.2 Interpretation der Beziehungen zwischen Ernährungszustand, Wuchsleistung und den bodenanalytischen Kennwerten

Die Ergebnisse meiner multiplen korrelationsanalytischen Verrechnung sind grundsätzlich durch die niedrige Freiheitsgradzahl (9) sowie durch die vergleichsweise geringen Zuwachsdifferenzen zwischen den Prüfvarianten im Untersuchungszeitraum belastet. Es ist trotzdem interessant zu prüfen, ob einige Korrelationen auf ursächlichen Beziehungen beruhen könnten.

- Beziehungen zwischen Volumenzuwachs und Ernährungszustand

Die mehrfache lineare Regression ergab, daß keine signifikanten Zusammenhänge zwischen dem Volumenzuwachs und den Nährelementgehalten der Kiefernadeln vorliegen. Nur eine positive Korrelation zu den N-Spiegelwerten deutet sich an. Erklärt wird dieser Befund damit, daß einerseits die Versuchsbestände zur Zeit mit N relativ gut versorgt sind. Andererseits treten in der letzten Kontrollperiode auch keine signifikanten Wachstumsunterschiede mehr zwischen den Prüfgliedern auf, obgleich die Bodenfruchtbarkeit durch die Meliorationsmaßnahmen deutlich verbessert wurde. Im übrigen beruhen die niedrigen Korrelationsgrade auch auf den niedrigen Freiheitsgraden.

- Beziehungen zwischen dem Volumenzuwachs und den bodenanalytischen Kennwerten

Gesicherte negative Zusammenhänge bestehen zwischen dem Volumenzuwachs und den H^+ -Gehalten im Mineralboden 0-10 cm nach der Schüttel-extraktmethode ($r = -0,73$) sowie mit den Fe- und Al-Gehalten nach beiden KAK-Bestimmungsmethoden und den entsprechenden Konzentrationen im Wasserextrakt. In diesen Beziehungen spiegelt sich der ertragskundliche Befund wider, daß die Kiefern auf den meliorierten Parzellen mit verbesserter Basensättigung deutlich - wenn auch nicht signifikant - besser wachsen als auf den Kontrollflächen. Bemerkenswert sind auch die ziemlich straffen Korrelationen zwischen dem Volumenzuwachs und den Gehalten an gesamtem und austauschbarem Mg sowie mit den Mg-Konzentrationen in der GBL. Andererseits sind sowohl die pH-Werte als auch die Ca-Gehalte mit dem Volumenzuwachs eindeutig positiv korreliert. In diesen Beziehungen spiegeln sich

die Meliorationseffekte wider. Insgesamt gesehen lassen sich die Wachstumsunterschiede statistisch am besten und eindeutigsten ($B = 0,83-0,91$) durch die Kennwerte nach dem Schüttelextraktverfahren erklären.

- Beziehungen zwischen den N- und Ca-Spiegelwerten einerseits und den bodenanalytischen Kennwerten andererseits

Die Ca-Spiegelwerte der Kiefern wurden durch die bodenchemischen Kennwerte besser bestimmt als die N-Spiegel. Außerdem ergaben die Varianzanalysen eine deutliche Differenzierung der Prüfglieder nach den Ca-, nicht aber nach den N-Spiegelwerten der Kiefernadeln. Die Ca-Versorgung der Kiefern war mit den pH-Werten, den Ca-Gehalten in allen untersuchten Fraktionen und z. T. auch mit den Mg-Gehalten im Boden straff korreliert. Dieser Befund ist darauf zurückzuführen, daß die Melioration die Ca-Sättigung an den Austauscheroberflächen und die Ca-Konzentrationen in der Bodenlösung nachhaltig steigerte, worauf die Kiefern mit einer Mehraufnahme an Ca reagierten. Die Kiefern waren aber in der Untersuchungsperiode auch auf den Kontrollflächen mit N relativ gut versorgt - aus noch nicht klar erkannten Gründen - und blieben im Zuwachs nur wenig hinter den meliorierten Beständen zurück; der verbesserte Basenstatus der Böden führte also am Ende der laufenden Beobachtungsperiode nicht zu einer entsprechend gesteigerten N-Aufnahme der Kiefern. Möglicherweise ist dafür die Konkurrenz der üppigen Bodenvegetation verantwortlich.

11.3 Zusammenfassende Beurteilung der Meliorationsverfahren

11.3.1 Vergleich der Meliorationsergebnisse mit vorgeschlagenen Kriterien zur Beurteilung der Kalkungs- bzw. Düngungsbedürftigkeit von Waldböden

In Tab. 63 und 64 werden die von ULRICH u. a. (1984) vorgeschlagenen Kriterien für die Beurteilung der Kalkungsnotwendigkeit mit den Ergebnissen für die untersuchten Versuchsvarianten verglichen.

Aus Tab. 63 geht hervor, daß die Ca-Sättigung im O-Horizont nach unseren Ergebnissen auch auf den Kiefern-Kontrollvarianten den vorgeschlagenen Grenzwert ($< 10\%$) übersteigt. Eine Kalkung wäre, beurteilt nach der Auflage und diesem Merkmal allein, nicht erforderlich, obwohl die Nadelanalysen deutlichen N- und Mg-Mangel der Kontrollbestände nachwiesen (MAKESCHIN et al., 1985). Im Mineralboden dagegen liegen bei allen Prüfgliedern sowohl die pH-Werte als auch das Molverhältnis Ca/Al in der Bodenlösung eindeutig unter dem Grenzwert, während die Ca-Sättigungsgrade fast aller Meliorationsvarianten (außer KAS) ausreichend hoch sind. Beurteilt nach den Kriterien für pH-Wert und Ca/Al-Molverhältnis in der Bodenlösung müßten alle Parzellen gekalkt werden, auch die bereits meliorierten Felder, obwohl der Zustand von Bestand und Vegetation (sowie die Ca-Sättigung im Falle der Meliorationsvarianten) gegen eine solche Maßnahme sprechen.

Ein ähnliches Bild ergibt sich, wenn man meine Analysenergebnisse mit den Anforderungen für die Entscheidung "Kalkung dringend erforderlich" nach ULRICH u. a. (1984) vergleicht. In der organischen Auflage wird der Grenzwert hinsichtlich der Ca-Sättigung ($< 5\%$) von allen Prüfvarianten - auch von den Kontrollparzellen - eindeutig übertroffen. Die pH-Werte im Auflagehumus der Kontrollparzellen und der KAS-Variante sprechen dagegen für eine Kalkung. Gemessen an der Bodenreaktion im Mineralboden (in H_2O und $CaCl_2$) müßten dagegen alle Prüfglieder - auch die meliorierten - dringend gekalkt werden. Die Ca-Sättigung im Mineralboden sowie das Ca/H-Molverhältnis in der GBL trennen scharf zwischen unbehandelten und meliorierten Varianten; gemessen an den Kriterien wäre eine Kalkung nach diesen Weisern nur auf den Kontrollparzellen angezeigt. Die H- und Fe-Sättigung an den Austauschern würde eine Kalkung überall dringend erforderlich erscheinen lassen, während das Ca/Al-Molverhältnis in der GBL nicht deutlich zwischen

Tab. 63: Vergleich der bodenanalytischen Kennwerte für verschiedene Versuchsvarianten mit den vorgeschlagenen Kalkungskriterien für die Stufe "Kalkung erforderlich"

Prüfglieder	Kriterien			
	org. Auflage		Mineralboden 0-10 cm	
	Ca-Sä. < 10 %	pH CaCl ₂ < 4,2	Ca-Sä. < 15 %	Mol-Ca/Al GBL < 1
WAL 234-KOM	24,7	3,1	3,9	0,41
WAL 228-KOM	24,6	3,1	3,3	0,55
ARCHENOHE-KOM	n.b.	3,1	4,4	0,42
WAL 228-KAS	48,0	3,2	12,2	0,56
WAL 228-KST	66,9	3,2	23,4	0,66
WAL 234-VOL	80,9	3,3	24,0	0,44
WAL 234-LUP	74,1	3,4	32,1	0,53
ARCHENOHE-ERLE	n.b.	3,3	17,8	0,27

n.b. : nicht bestimmt
Sä. : Sättigungsgrad

Tab. 64: Vergleich der bodenanalytischen Kennwerte für verschiedene Versuchsvarianten mit den vorgeschlagenen Kalkungskriterien für die Stufe "Kalkung dringend erforderlich"

Prüfglieder	Kriterien							
	org. Auflage		Mineralboden 0-10 cm					
	pH-H ₂ O < 3,9	Ca-Sä < 5 %	pH-H ₂ O < 3,9	pH-CaCl ₂ < 3,8	Ca-Sä < 5 %	H+Fe > 2-5%	Mol-Ca/Al GBL < 0,3	Mol-Ca/H GBL < 1,0
WAL 234-KOM	3,5	24,7	3,4	3,1	3,9	30,3	0,41	0,52
WAL 228-KOM	3,4	24,6	3,3	3,1	3,3	31,7	0,55	0,41
ARCHENOHE-KOM	3,1	n.b.	3,5	3,1	4,4	28,5	0,42	0,31
WAL 228-KAS	3,7	48,0	3,4	3,2	12,2	27,6	0,56	1,85
WAL 228-KST	3,9	66,9	3,5	3,2	23,4	25,0	0,66	3,11
WAL 234-VOL	4,3	80,9	3,8	3,3	24,0	22,9	0,44	9,47
WAL 234-LUP	4,2	74,1	3,8	3,4	32,1	28,7	0,53	10,70
ARCHENOHE-ERLE	4,0	n.b.	3,5	3,3	17,8	24,8	0,27	1,82

n.b. : nicht bestimmt
Sä. : Sättigungsgrad

Kontrollfeldern und meliorierten Parzellen trennt und die Grenzwerte fast in jedem Fall (außer Erle-Archenohe) übertrifft.

Insgesamt ergibt der Vergleich, daß die vorgeschlagenen Kriterien für die Kiefernbestände auf Phyllit in Waldsassen nicht zutreffen und überprüft werden müssen; denn nach diesem Vorschlag liefern die verschiedenen Kriterien für die verschiedenen Horizonte oft widersprüchliche und z. T. auch ökologisch unsinnige Entscheidungshinweise. Die pH-Werte, die H- und Fe-Sättigung an den Austauschern und das Ca/Al-Verhältnis in der GBL differenzieren nach meinen Erfahrungen nicht genügend zwischen den verschiedenartig behandelten Parzellen. Dagegen sind vor allem die Ca-Sättigung und das Ca/H-Molverhältnis prinzipiell besser geeignet, weil sie gut diskriminieren. Allerdings müßten wohl die Grenzwerte teilweise abgeändert werden.

Aus Tab. 65 geht hervor, daß die K-Sättigungswerte in der organischen Auflage und im Mineralboden 0-10 cm fast aller Prüfvarianten zur Einstufung in die Kategorien "Kalkung erforderlich" bzw. "Kalkung dringend erforderlich" berechtigen würden, da sie eine "sehr geringe bzw. geringe Elastizität" nachweisen. Dagegen sprechen aber die Nadelanalysen und die K_t -Bestimmung im Boden eindeutig für eine optimale Versorgung bzw. Ausstattung aller Versuchsglieder mit Kalium.

Während gemessen an der Mg-Sättigung in der organischen Auflage (mit "mittlerer bis hoher Elastizität") keine Mg-Düngung erforderlich wäre, legen die Analyseergebnisse für den Mineralboden fast aller Varianten eine solche Entscheidung nahe, wobei nach Melioration hohe Ca-Sättigungen (i.d.R. < 15 %) auftreten. Hier wurde Mg an den Austauschern offensichtlich durch Ca verdrängt, was sich im Mg/Ca-Verhältnis der entsprechenden Bodenlösungen bestätigt.

Demnach bedürfen auch diese vorgeschlagenen Kriterien dringend einer Änderung.

11.3.2 Zusammenfassende Bewertung der Meliorationsverfahren

Seit Jahrzehnten wird durch verschiedenartige Meliorationsexperimente angestrebt, die Fruchtbarkeit der sauren und oxidreichen, degradierten Phyllitsubstrate im nördlichen Bayern nachhaltig anzuheben. Die

Wege, die dazu beschriftet werden, reichen von der Waldbache (DIEPOLD, 1948) über intensive Bodenbearbeitung (THIELMANN, 1951) bis zu großflächiger Ausbringung mineralischer Dünger (KREUTZER, 1967; FRANZ und BIERSTEDT, 1973; BÜRSCHER et al., 1977). Zwei grundsätzlichen verschiedenen Meliorationsansätze sind erkennbar:

- a) Bestands-Kalkung ergänzt durch mineralische Düngung (vor allem N-P) sowie teilweiser Unterbau mit stickstoffsammelnden Hilfspflanzen (vgl. u. a. REHFUESS und SCHMIDT, 1981; REHFUESS, 1981; PREUßLER und REHFUESS, 1982).
- b) Maßnahmen unmittelbar vor und bei Bestandsneugründung. Dabei erfolgen Kahlschlag der Altbestände, verschiedenartige Bodenbearbeitung, Grunddüngung mit P, Ca und Mg, wiederholte N-Düngung, Mit-anbau von meliorierenden Mischbaumarten sowie N-sammelnden Hilspflanzen (siehe dazu REHFUESS, 1981; ERUZ et al., 1985).

In Tab. 66 sind die in den überprüften Experimenten durchgeführten Meliorationsmaßnahmen zusammenfassend beschrieben. Tab. 67 berichtet über die wichtigsten Veränderungen der Bodenfestphase.

- Veränderungen der Bodenfestphase

Die Meliorationsverfahren führten zu einer Beschleunigung der Streuzersetzung und veränderten die Humusformen. Der inaktive Rohhumus der Kiefern-Kontrollflächen wurde bei den mit geringer bis mäßiger Kalkgabe (ohne Bodenbearbeitung) behandelten Varianten KAS, KSt (im Versuch WAL 228) und Volldüngung (im Versuch WAL 234) durch einen günstigen schwarzen, lockeren rothumusartigen Moder bzw. typischen Moder abgelöst. Auf den mit oberflächlicher Bodenbearbeitung (bei gleichzeitig mäßiger Kalkgabe) behandelten Varianten Lupinen-Unterbau, MW3 und Bi entwickelte sich als Humusform ein mullartiger Moder bzw. typischer Moder bis F-Mull.

Durch alle diese Verfahren mit geringer bis mäßiger Kalkgabe wurden Artenzusammensetzung und Besatzdichte der Regenwürmer nicht verändert. Eine Verbesserung der Humusform zu typischem Mull mit hohem Wurmbe-satz bedarf wohl längerer Fristen oder besonders hoher Kalkgaben (ERUZ et al., 1985). Der F-Mull auf den Vollumbruch (Erle)- und Wald-brache (MW4)-Flächen mit den höchsten Kalkgaben und tiefgreifender

Tab. 66: Übersicht über die durchgeführten Meliorationsmaßnahmen in verschiedenen Experimenten im FA Waldsassen

Versuchs-Variante (Anlagejahr)	Boden- bearbeitung	Kalkgabe	Düngungsmaßnahmen (kg/ha)				weitere Maßnahmen	
			N	P	K	Ca	Mg	
WAL 228-KAS (1960)	-	niedrig	515	105	83	815	37	Df.
WAL 228-KST (1960)	-	mäßig	500	105	83	1520	37	Df.
WAL 23H-VOLL (1964)	-	mäßig	370	95	90	2095	32	Df.
WAL 23H-LUP (1964)	Fräsung	mäßig	LE 10 kg/ha	95	90	1900	32	Df.
GROSSDICK-MW3 (1950)	oberflächlich	mäßig	LE 6 kg/ha	?	?	(2000)?	?	Einbringung von Edelbaum- arten
GROSSDICK-B1 (1950)	oberflächlich	mäßig	LE 6 kg/ha	?	?	(2000)?	?	Kahlschlag/Stockrodung Bepflanzung mit Birke
GROSSDICK-MW4 (1950)	bis ca. 30 cm	hoch	LE 6 kg/ha	?	?	(3800)?	?	Einbringung von Edelbaum- arten
ARCHENHÖE-FRIE (1954)	Vollumbruch	hoch	LE 8 kg/ha	?	?	3800	?	Kahlschlag/Stockrodung Bepflanzung mit Weibere

LE.: Lupineninsaat
Df.: Durchforstung

Tab. 67: Humusformen und pH-Werte sowie prozentuale Veränderung der C_{org} , N_t , P_t und Ca -Vorräte (org. Auflage und Mineralboden 0-30 cm) bei den Meliorationsvarianten im Vergleich zu den unbehandelten Kiefernbeständen

Eigenschaften der Bodenfest- phase	Kiefern- Vergleichs- flächen	Prüfgrößen						
		KAS 228	KSI 228	VOL 234	LUP 234	MW3 Graddock	MW4	ERLE Archenhohe
Humusform	Rohhumus	Rohhumus- Moder	Rohhumus- Moder	typ.- Moder	Mull- moder	Mull- moder	F-Mull- Moder	F-Mull
C-org. (t/ha)	72,3 - 89,1	- 3,3	+ 6,0	- 7,4	- 18,1	- 7,7	- 31,8	- 27,9 - 19,9
Nt (kg/ha)	3447 - 4507	+ 4,1	+ 9,1	+ 0,5	- 7,7	+ 6,3	- 7,6	+ 14,4 + 15,0
Pt (kg/ha)	1377 - 1920	+ 16,5	+ 0,0	- 2,5	+ 3,1	+ 21,1	- 13,9	- 3,3 - 14,2
pH - CaCl ₂ (org. Aufl.)	2,8 - 3,1	3,1	3,4	3,8	3,7	3,7	4,1	4,2 4,0
Cat (kg/ha)	917 - 2105	+ 33,4	+ 66,3	+ 69,8	+ 37,9	+ 35,1	+ 40,9	+ 131,2 + 114,2

Bodenbearbeitung belegt, daß ein solcher Wechsel prinzipiell möglich ist. Die Wiederansiedlung leistungsfähiger Regenwürmer und anderer Bodentiere dokumentiert gleichzeitig eine starke mikrobielle Tätigkeit (MAKESCHIN, 1983).

Die Verbesserung der Humusform erfolgte bei den Prüfgliedern mit geringer Kalkgabe ohne Bodenbearbeitung (KAS- und KSt-Varianten im Exp. WAL 228) schonend und nahezu ohne Humusverluste; dabei trat eine geringe Stickstoffvorraterhöhung auf. Auf der mit wiederholten Kalkammonsalpetergaben und höheren Ca-Mengen meliorierten Volldüngungs-Variante im Versuch WAL 234 (ebenfalls ohne Bodenbearbeitung) wurde der Humusschwund aus der organischen Auflage durch Mehrung im Mineralbodenbereich nahezu kompensiert; die Stickstoffvorräte veränderten sich nicht signifikant. Auf den mit Lupine unterbauten Feldern wurden dagegen beträchtliche Stickstoff- (8 %) und Humusverluste (18 %) registriert wegen der erforderlichen Bodenbearbeitung (Fräsung). Das Fräsen löste erhebliche Wurzel- und Kronenschäden aus, so daß das durch Mineralisation und N_2 -Bindung vermehrte Stickstoffangebot nur teilweise aufgenommen werden konnte und damit viel Stickstoff durch Auswaschen oder Denitrifikation verloren ging (REHFUESS, 1981). Andere Autoren bestätigen die Auswaschung von Ca (SEIET et al., 1977; HETSCH und ULRICH, 1979).

Andererseits waren die Humusverluste auf der ebenfalls oberflächlich bearbeiteten und mit mäßiger Kalkgabe behandelten MW3-Variante geringer als bei Lupinen-Unterbau und eher vergleichbar mit den Verlusten nach Volldüngung. Auf der MW3-Fläche war der Abbau der Humusvorräte vermutlich durch teilweise Überschirmung und mäßige Kalkgabe begrenzt.

Auf der Bi-Parzelle, wo die Kalkmenge und die Intensität der Bodenbearbeitung vermutlich niedriger waren als bei der MW4-Variante, wurde die Mineralisation durch das Klima auf der Kahlfläche zusätzlich angeregt, so daß erhebliche Humus- (32 %) und Stickstoff- (8 %)-Verluste eintraten.

Nach Vollumbruch und Erlenanbau sowie nach Waldbrache (MW4) mit tieferreichender Bodenbearbeitung (bis ca. 30 cm) und hoher Kalkgabe waren die Humusverluste ebenfalls sehr hoch (20 bzw. 28 %). Immerhin bewirkten die oberflächliche bis intensive Bodenbearbeitung zusammen mit dem Anbau von Weißerle nach Vollumbruch und die Bepflanzung mit Laub-

baumarten bei den Verfahren MW3 und MW4, hier möglicherweise kombiniert mit Teichschlamm-Zufuhr, eine wesentliche Erhöhung des Stickstoffkapitals. Diese wurde allerdings mit bedeutenden Humusverlusten erkauft. Auch ist bei der Erlen-Variante zu berücksichtigen, daß ein Teil der N-Anreicherung durch das Aufbringen von Auflagehumus bewirkt wurde.

Die Phosphatdüngung wirkte sich auf die P-Gehalte in der organischen Auflage aller Prüfglieder positiv aus. Die P-Vorräte stiegen jedoch nur auf der KAS- (nicht signifikant) und der MW3-Variante. Die P-Mehrung auf der MW3-Parzelle beruht wahrscheinlich auf dem in hohen Mengen ausgebrachten phosphorreichen Teichschlamm.

Auf allen Flächen ließ die Ca-Düngung die pH-Werte sowie die Ca-Vorräte und -Gehalte in der organischen Auflage und im oberen Mineralboden (0-10 cm) ansteigen; auch nach 22-38 Jahren waren noch deutliche Kalkungseffekte nachweisbar. Ein besonders tief reichender Anstieg der pH-Werte und Ca-Gehalte wurde auf der MW4-Variante festgestellt. Auf dem Versuchsglied Vollumbruch-Erle ist die für die biologische Aktivität wichtige pH-Steigerung trotz Tiefpflügung nur in der org. Auflage nachweisbar. Nach beiden Verfahren (MW4 und Erle) sind die Ca-Vorräte indessen über einen etwas größeren Tiefenbereich verteilt im Vergleich zu den anderen Verfahren.

Die schwache K-Mg-Düngung hat auf keiner der Meliorationsvarianten die Vorräte dieser Elemente gesteigert, jedoch wurden ihre Gehalte in der organischen Auflage signifikant erhöht.

- Kationenaustauscheigenschaften

Tab. 68 faßt die Ergebnisse der KAK_{ex} -Bestimmungen sowie die H+Al-, Ca-, Mg- und Basen-Anteile an der KAK_{ex} (nach dem Schüttelverfahren) für die untersuchten Versuchsglieder im Mineralboden 0-10 cm zusammen.

Die Meliorationsmaßnahmen bewirkten auch noch nach langer Laufzeit der Experimente eine Verbesserung der Austauschigenschaften im Oberboden der Waldsassener Versuchsreihe. Auf den meliorierten Flächen ist insbesondere die Ca-Sättigung angestiegen; hingegen gingen die Al-, Fe- und H-Anteile eindeutig zurück. In der entsprechenden Bodentiefe wurden auch die Ca/H- und Ca/Al-Molverhältnisse zugunsten des Ca verschoben. Die Mg-Belegung und das Molverhältnis Mg/Al wurden in

der organischen Auflage und bis etwa 10 cm im Mineralboden verbessert.

Nach der Volldüngung im Experiment WAL 234 war die Ca-Sättigung im gesamten untersuchten Wurzelraum bis 30 cm Mineralbodentiefe erhöht. Entsprechend reagierten die Molverhältnisse von Ca/H und Ca/Al. Die durch die Kalkung bedingte Erhöhung des Ca-Anteils am Austauscher war jedoch nach Volldüngung nur in der organischen Auflage wesentlich stärker als im Experiment WAL 228; im Mineralboden (vor allem in 10-30 cm Tiefe) nähern sich die Ca- und Basensättigungswerte an, was auf der nur oberflächigen Kalkausbringung beruhen dürfte. Der Mg-Sättigungsgrad sowie das Mg/Al-Molverhältnis waren nach Volldüngung in der organischen Auflage und 0-10 cm Bodentiefe bedeutend erhöht.

Auf den nur mäßig gekalkten, dafür aber oberflächlich bearbeiteten Versuchsgliedern MW3, Bi und Lupine reicht die Kalkwirkung wegen des Einarbeitens bis mindestens 30 cm Tiefe und führt auch dort noch zu höheren Ca- und Mg-Sättigungen als auf den nicht bearbeiteten Flächen. Auf den gepflügten Parzellen Vollumbruch-Erle und Waldbrache-MW4 sind die Ca- und Mg-Sättigungsgrade auch noch in größerer Tiefe angestiegen, wobei das Prüfglied MW4 die höchste Basensättigung überhaupt aufweist. Mit gewisser Wahrscheinlichkeit wurde hier auch die größte Kalkmenge ausgebracht.

Tab. 69 informiert außerdem über die Verhältnisse der austauschbaren Vorräte von Ca/Al, Ca/H und Mg/Al. Diesen Parametern kommt eine hohe ökologische Aussagekraft hinsichtlich der Effektivität der Meliorationsmaßnahmen zu. Die Ca/Al- und Ca/H-Quotienten bis 30 cm Tiefe wurden auf den nur mäßig gekalkten Parzellen (einschließlich Volldüngung) sowie auf der Erlen-Variante in ähnlicher Weise angehoben. Bei letzterer wurden allerdings die austauschbaren Vorräte in der organischen Auflage nicht mit erfaßt. Eine Sonderstellung nimmt wiederum die MW4-Parzelle ein, wo die vermutete starke Kalkung das Ca/Al- und Ca/H-Verhältnis ungewöhnlich stark ansteigen ließ.

Das Mg/Al-Verhältnis ist durch die Meliorationseingriffe nur auf den Parzellen, die eine Bodenbearbeitung erfahren haben, deutlich erhöht worden.

- Auswirkungen auf die Bodenlösung

Die Meliorationseffekte spiegeln sich auch in der Zusammensetzung der GBL und des WE der untersuchten Versuchsreihe wider. Tab. 70 und 71 fassen die Veränderungen der pH-Werte sowie der Al- und Ca-Anteile an der SKa in GBL und WE im Oberboden (0-10 cm) zusammen.

Die Meliorationseingriffe erhöhten die pH-Werte sowie die Ca-Konzentrationen und -Anteile eindeutig verglichen mit den Kontrollwerten. Im Versuch WAL 228 stieg der pH-Wert nach KSt- und KAS-Düngung trotz unterschiedlicher Ca-Zufuhr etwa um denselben Betrag. Die Zunahme der Ca-Konzentrationen war im Gegensatz zu den pH-Werten in GEL und WE an fast allen Terminen noch bis etwa 30 cm Tiefe signifikant, wobei Prüfglied KSt etwas besser abschnitt als die Variante KAS. Darüberhinaus hat die Melioration in mehreren Horizonten auch zu einer deutlichen Verbesserung der Molverhältnisse Ca/H, Mg/Ca, Ca/Al und Mg/Al in den WE-Lösungen geführt.

Die höhere Kalkgabe im Versuch WAL 234 bewirkte einen noch tieferreichenden Anstieg der pH-Werte (etwa 20 cm) und der Ca-Konzentrationen (bis 30 cm) verglichen mit dem Versuch WAL 228. Auf der Lupinenvariante übertreffen die Ca-Konzentrationen in 30 cm Tiefe im WE und in der GBL die Vergleichswerte der Volldüngungspartellen, was zum Teil auf Einarbeitungseffekten, teilweise aber auch auf einer rascheren Tiefenverlagerung des Ca beruhen dürfte. Die Molverhältnisse Ca/H, Mg/Ca und Ca/Al steigen entsprechend an allen Terminen in beiden Lösungen signifikant an (Ausnahme: Mol Ca/Al in 0-10 cm Tiefe bei der GEL).

Auch in den Versuchen Großdick und Archenohe sind die Meliorationseffekte im Anstieg der pH-Werte und Ca-Konzentrationen meistens bis 30 cm eindeutig erkennbar. Unter Erle wurden vermutlich als Folge erhöhter Nitrifikation auch $\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{SO}_4\text{-S}$ in den Bodenlösungen beeinflusst. Trotz höherer pH-Werte sowie höherer Ca- und z. T. Mg-Konzentrationen traten auf den meliorierten Parzellen in der GBL zumindest tendenziell auch höhere Al- und Fe-Konzentrationen auf als in vergleichbaren Horizonten der Kiefern-Kontrollflächen. Vermutlich liegen Al und Fe bei den Meliorationsvarianten hauptsächlich in komplexierter Bindung vor (vgl. SCHWERTMANN und NÄTSCHER, 1985; KREUTZER 1986, pers. Mitteilung). Als Folge der Melioration werden möglicherweise viele wasserlösliche Chelatoren gebildet, welche Al und Fe mobili-

Tab. 70: Zeitliche Veränderung der pH-Werte in GBL, WE und in der Bodensuspension (in Wasser und CaCl_2) im Oberboden (0-10 cm) der Versuchsglieder

pH- Werte			Kiefern- Vergleichs- flächen	Prüfglieder					
				KAS 228	KST 228	VOLL 234	LUP 234	ERLE Arch.	MW4 Großdick
pH-GBL	Apr.	3,7	3,9	3,9	4,4	4,5	4,1		
	Jul.	3,8	4,0	4,1	4,2	4,4	4,0		
	Okt.	3,7	4,0	4,3	4,3	4,6	3,9	4,3	4,2
pH-WE	Apr.	3,2	3,5	3,4	3,6	3,6	3,4		
	Jul.	3,6	3,7	3,8	3,8	3,9	3,6		
	Okt.	3,5	3,6	3,7	3,7	4,2	3,5	3,9	3,8
pH-H2O	-	3,4	3,4	3,5	3,8	3,8	3,5	4,1	3,8
pH-CaCl2	-	3,1	3,2	3,2	3,3	3,4	3,3	3,9	3,5

Tab. 71: Zeitliche Veränderung der Kationensumme (mmol IÄ/l) in GBL und WE sowie der entsprechenden Al- und Ca-Prozentanteile im Vergleich zu den jeweiligen Anteilen an der KAK_{ex} (mmol IÄ/100g) im Oberboden (0-10 cm) der Versuchsglieder

			Kiefern- Vergleichs- flächen	Prüfglieder					
				KAS 228	KST 228	VOLL 234	LUP 234	ERLE Arch.	MW4 Grossdick
SKa-GBL	Apr.	2,3	5,3	4,9	6,4	6,1	4,9		
	Jul.	3,2	4,1	7,7	10,1	10,6	3,2		
	Okt.	3,5	6,4	6,8	7,1	5,2	3,2	4,5	4,2
SKa-WE	Apr.	11,2	12,3	13,9	9,1	11,8	12,0		
	Jul.	8,6	7,7	7,9	6,4	7,7	6,4		
	Okt.	9,3	7,8	8,1	7,1	10,4	7,1	13,2	3,8
KAK ex.	-	8,3	9,1	8,5	8,9	9,5	8,6	11,8	3,8
%Al-GBL	Apr.	26,4	35,9	25,6	42,7	38,0	36,2		
	Jul.	22,7	31,8	42,1	47,4	42,9	18,2		
	Okt.	25,4	41,9	39,9	45,1	31,3	15,9	23,2	4,2
%Al-WE	Apr.	44,9	42,2	43,7	35,3	40,1	47,8		
	Jul.	43,4	39,9	32,7	24,3	26,8	29,0		
	Okt.	41,0	35,6	32,4	27,0	17,7	34,6	20,9	3,8
%Al-KAKex	-	52,0	43,8	32,7	41,6	29,9	40,4	14,1	3,8
%Ca-GBL	Apr.	7,9	13,5	15,9	12,3	12,7	6,6		
	Jul.	4,7	9,8	9,1	5,1	7,4	16,5		
	Okt.	6,3	7,1	11,2	9,3	23,8	24,7	37,5	48,6
%Ca-WE	Apr.	2,6	14,1	22,3	30,0	28,5	15,5		
	Jul.	3,2	15,6	29,1	29,2	47,5	29,1		
	Okt.	4,0	13,4	32,1	35,2	63,3	24,0	59,1	60,5
%Ca-KAKex	-	3,7	14,3	26,8	24,5	35,6	23,8	66,6	37,0

sieren. Im WE gingen im Gegensatz zur GEL auf den Meliorationsvarianten die Al- und Fe-Konzentrationen im Vergleich zu den Kontrollparzellen zurück. Möglicherweise führte die Trocknung der Proben hier zur irreversiblen Ausfällung der Komplexe.

11.4 Empfehlungen für die Praxis

Es lassen sich aus dieser Arbeit folgende abschließende Empfehlungen für die Praxis ableiten:

a) Meliorationsverfahren

Bei den Verfahren "Vollumbruch", "Waldbrache" und "Lupinenunterbau" (jeweils mit intensiver Bodenbearbeitung) muß mit beträchtlichem Aufwand und mit Humus- und N-Verlusten gerechnet werden. Mit dem Verfahren der geringen bis mäßigen Kalkung (mit Mg-haltigen Kalken) und P-Düngung, ergänzt durch ebenfalls mäßige, wiederholte Kalkammonsalpetergabe (ohne Bodenbearbeitung) werden dagegen sowohl der Ernährungszustand und die Wuchsleistung der Kiefern als auch die Bodenfruchtbarkeit nachhaltig verbessert, ohne daß N- oder Humusverluste auftreten. Die Anwendung dieses Meliorationsverfahrens ist deshalb besonders empfehlenswert, da es in ökologischer und wahrscheinlich auch in ökonomischer Hinsicht bei der Melioration von Kiefernbeständen auf sauren und degradierten Phyllitsubstraten am besten abschneidet.

b) Analysenverfahren

Für einzelne wissenschaftliche Fragestellungen ist es durchaus angebracht, die KAK-Perkolationsmethode oder das GEL-Verfahren unter Berücksichtigung ihrer methodischen Probleme einzusetzen. Für Routine-Untersuchungen zur Charakterisierung und Bewertung von Meliorationsmaßnahmen empfehle ich dagegen als besonders aussagekräftige Methoden die Schüttelextraktion (austauschbare Phase) und das 2:1-Wasserextraktverfahren (lösliche Phase).

12. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden die Auswirkungen von Meliorationsmaßnahmen auf drei Gruppen von Kenngrößen für die Nährstoffausstattung von Waldboden geprüft: Die Gesamtgehalte und -vorräte an Nähr-
elementen, die Gehalte und Vorräte an austauschbaren kationischen Elementen und die Zusammensetzung der Bodenlösung (analysiert mit verschiedenen Methoden).

Die Untersuchungen sollten Antworten auf folgende Fragestellungen liefern:

- a) Wie wirken sich die verschiedenen Meliorationsmaßnahmen auf die chemische Zusammensetzung des Bodens, die Elementgehalte in den Nadeln und das Wachstum der Bäume aus?
- b) Welche Art von Bodenanalyse ist am besten dazu geeignet, die Meliorationswirkungen zu charakterisieren?
- c) Welche Beziehungen gibt es zwischen den Bodenkennwerten, dem Ernährungszustand und dem Wachstum der Bestände?

Die im Wuchsbezirk "Waldsassener Schiefergebiet" (nordöstlicher Teil der Oberpfalz) ausgewerteten vier Experimente sind in ehemals streugenutzten, devastierten Kiefernstandorten auf sauren Podsol-Braunerden aus schluffigen, oxidreichen Phyllitsubstraten angelegt. Dabei handelt es sich um Versuche zur Überprüfung kombinierter technisch-biologischer Maßnahmen und Düngungsmaßnahmen wie:

Volldüngung (NPKCaMg-Düngung) und Lupinenunterbau (mit PKCaMg-Düngung) im Versuch WAL 234 (mit 3 Versuchsgliedern in dreifacher Wiederholung),

Stickstoff-Düngung (Kalkstickstoff bzw. Kalkammonsalpeter - PKCaMg-Düngung) im Versuch WAL 228 (mit 3 Prüfgliedern in zweifacher Wiederholung),

Weißerlenanbau im Versuch Archenohe (mit 2 Prüfgliedern ohne Wiederholung) und das sogenannte

Waldbrache-Verfahren mit Unterpflanzung von Laubbaumarten (Birken, Edellaubbaumarten) unter Kiefernschirm im Versuch Großdick (mit 4 Prüfgliedern in zweifacher Wiederholung).

Jedes Experiment enthält als Prüfglieder auch Kiefern-Vergleichsflächen (Kontrollvariante).

In den Jahren 1983-1985 wurden die Bodenproben eingeholt, zahlreiche methodische Voruntersuchungen angestellt sowie die Serienanalysen durchgeführt. Alle vier Versuchsflächen wurden grundsätzlich auf pH, organischen Kohlenstoff, Gesamtstickstoff, Gesamt-Phosphor sowie auf Gesamt-Ca, -Mg, -K, -Na, -Fe, -Al, -Mn, -Zn und -Cu analysiert. Mit zwei KAK-Bestimmungsmethoden (Perkolations- und Schüttelextraktverfahren) wurden die Gehalte an den austauschbaren Kationen Al^{3+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Na^+ , Ca^{2+} und Mg^{2+} in NH_4Cl -Lösung bestimmt und die H^+ -Gehalte aus dem pH-Wert errechnet. In der GBL und im 2:1-Wasserextrakt wurden die pH-Werte, die Konzentrationen der Kationen (Al^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , $\text{NH}_4^+\text{-N}$) und der Anionen (NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) für jeweils drei Entnahmetermine (April, Juli, Oktober 1984) ermittelt.

Besonders die Experimente WAL 228 und WAL 234 werden seit langem auch nadelanalytisch und ertragskundlich überwacht. Die ertragskundlichen Kenndaten dieser Versuchsglieder stellte der Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Forstwissenschaftlichen Fakultät München zur Verfügung, die Ergebnisse der Nadelanalysen stammen teils vom Lehrstuhl für Bodenkunde, teils von der Bayer. Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt. Die Boden- und Wasseranalysen sowie die ertragskundlichen und nadelanalytischen Parameter wurden mit Hilfe von Varianz-, Diskriminanz- und multiplen Regressionsanalysen intensiv statistisch ausgewertet.

Die Untersuchungen lieferten folgende Ergebnisse:

a) Beurteilung der Meliorationsverfahren

1. Die Meliorationsmaßnahmen spiegeln sich auch 22 bis 36 Jahre nach Anlage der Experimente noch in den Humusformen, der Bodenreaktion, den Gesamtvorrräten einzelner Nährstoffe (C, N, Ca), dem Kationenbelag und in bestimmten Kennwerten der Bodenlösung wider.
2. Alle beobachteten Veränderungen sprechen dafür, daß eine beträchtliche Steigerung der Bodenfruchtbarkeit erreicht wurde. Im Versuch Großdick (Waldbrache) gedeihen heute anspruchsvolle Baumarten, im Versuch Archenohe wuchsen vitale Weißerlenbestände auf. Es bedurfte in beiden Versuchen allerdings eines jahrzehntelangen Ver-

zichts auf Holz- und Wertertrag, um die Fruchtbarkeit der Böden nachhaltig zu steigern. Auch mußten ein beträchtlicher Aufwand, Humus- und N-Verluste in Kauf genommen werden.

3. Auf den mit Lupine unterbauten Parzellen verbesserten sich die Wuchsleistung und der Ernährungszustand der Kiefern gegenüber der entsprechenden Kontrollvariante. Seit 1975 übertrifft die Lupinenvariante sogar das Versuchsglied "Volldüngung". Die Stickstoff- und Humusvorräte sind allerdings abgesunken, vermutlich vor allem als Folge der anfangs durchgeführten Fräsung, die starke Wurzelschäden am stehenden Bestand verursachte.
 4. Auf den mit geringen bis mäßigen (dolomitischen) Kalk-, Phosphat- und wiederholten Kalkstickstoff- bzw. Kalkammonsalpetergaben gedüngten Versuchsflächen (ohne Bodenbearbeitung) wurden sowohl der Ernährungszustand als auch die Wuchsleistung der Kiefern deutlich verbessert, ohne daß erhebliche Stickstoff- oder Humusverluste auftraten. Die Basensättigung in der Auflage und im Mineralboden bis mindestens 30 cm Tiefe stieg deutlich an. In ökologischer und betriebswirtschaftlicher Hinsicht erweisen sich diese Verfahren daher als besonders günstig für die Melioration saurer, degradierter Phyllitstandorte.
- b) Untersuchungen über die eingesetzten Analyseverfahren hinsichtlich ihrer Aussagekraft für Meliorationseffekte
1. Die Meliorationswirkungen spiegeln sich in den Ergebnissen der Gesamtnährelementgehalts-Bestimmungen gut wider. Dies gilt vor allem für die C-, N-, Ca-, Mg-, K- und Na-Gehalte im Oberboden. Die Gehalte und Vorräte an Säure-Kationen (Fe, Al, Mn) werden dagegen nicht durch Meliorationsmaßnahmen verändert. Mit Hilfe der Ergebnisse der Analysen auf Gesamtnährelementgehalte sowie der pH-Werte in der organischen Auflage und im obersten Mineralboden lassen sich die Versuchsglieder in Diskriminanzanalysen gut trennen. Im tieferen Mineralboden ist die Zuordnung der Parzellen zu Prüfvarianten dagegen mit diesem Vorgehen nur unvollständig, da die Meliorationseingriffe die genannten Parameter in dieser Tiefe kaum beeinflussten.

2. Das Perkolationsverfahren zur Bestimmung der KAK lieferte in den meisten Fällen höhere Al- und Fe-Gehalte als die Schüttelextraktion; diese hingegen weist höhere H-, K- und Na-Gehalte nach. Für Ca, Mn und Mg sowie für die KAK und den Basensättigungsgrad stimmen die Ergebnisse beider Verfahren vielfach gut überein. Die Ergebnisse der Schüttelextraktmethode führen insgesamt zu einer besseren diskriminanzanalytischen Trennung (100 %) der Versuchsglieder als jene des Perkolationsverfahrens; die erstgenannte Methode besitzt also für die Phyllitsubstrate die bessere ökologische Aussagekraft.
3. In beiden untersuchten Bodenlösungen (GBL und WE) werden die Elementkonzentrationen von der unterschiedlichen Vorbehandlung der Proben beeinflusst; außerdem treten aufgrund der räumlichen Variabilität stärkere Streuungen der Elementkonzentrationen auf. Diese Faktoren können Meliorationseffekte überdecken. Eine erhebliche jahreszeitliche Abhängigkeit der Elementkonzentrationen war dagegen bei den untersuchten Varianten nicht zu beobachten.

Meliorationsbedingte Veränderungen wurden vor allem für die pH-Werte und die Konzentrationen an Ca und Mg (zum Teil auch von K, Na und Mn) sowie für die Molverhältnisse Ca/H und Mg/Ca an den meisten Entnahmeterminen insbesondere im Oberboden nachgewiesen. Für Al und Fe fand ich in der GBL zum Teil signifikant höhere Konzentrationen im Oberboden der meliorierten Flächen, was auf einen höheren Komplexierungsgrad der Al- und Fe-Ionen in der Lösung der Meliorationsvarianten hinweist.

In den Diskriminanzanalysen lieferten die Ergebnisse des WE-Verfahrens bessere Zuordnungs- und Trennungsgrade als jene der GBL-Untersuchung. Dieser Befund beruht vermutlich darauf, daß das Verfahren der WE-Untersuchung besser standardisiert ist. Außerdem gingen im WE die nach Melioration stets erhöhten Konzentrationen an Ca immer einher mit geringeren Al-(Fe-)Konzentrationen, was ebenfalls zu größerer Diskriminierung führt.
4. Aus dem Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit den vorgeschlagenen Kalkungskriterien geht hervor, daß diese nur sehr beschränkt geeignet sind und überarbeitet werden müssen. Prinzipiell scheinen die Merkmale "Ca-Sättigung am Austauscher" und "Ca/H"-Molver-

hältnisse in der Bodenlösung brauchbar zu sein; die vorgeschlagenen Grenzwerte bedürfen jedoch der Überprüfung.

- c) Beziehungen zwischen bodenanalytischen Kennwerten, dem Ernährungszustand und dem Wachstum der Bestände

1. Mit Hilfe mehrfacher linearer Regressionsanalysen wurden mehrere Ausgleichsfunktionen für die Beziehungen zwischen dem Volumenzuwachs bzw. den N- und Ca-Spiegelwerten in den Kiefernadeln (y-Variable) und den bodenchemischen Methoden (x-Variable) hergeleitet.

Zwischen der Wuchsleistung und dem N-Ernährungszustand fand ich nur eine lose positive Korrelation. Der Volumenzuwachs war jedoch mit den Gehalten an austauschbarem Σ , Al und Fe im Oberboden mit den H-, Al- und Fe-Konzentrationen im WE negativ korreliert. Die pH-Werte ebenso wie die austauschbaren und wasserlöslichen Ca- und Mg-Gehalte standen in positivem Zusammenhang zur Wuchsleistung. Die Variation des Volumenzuwachses konnte in erheblichem Ausmaß statistisch mit der Variation der verschiedenen Sätze von Bodenparametern im Mineralboden 0-10 cm erklärt werden (KAK_{ex} : B = 0,91; GA: 0,91; WE: 0,72; KAK_{eff} : 0,49; GEL: 0,44).

2. In der Regel ließ sich eine deutliche Abhängigkeit der Ca- und N-Spiegelwerte in den Nadeln von den Ca-Gehalten in Boden und Bodenlösung nachweisen. Die Variation des Ca-Ernährungszustandes wurde statistisch durch die Variation der Bodenparameter im Mineralboden 0-10 cm in folgendem Ausmaß bestimmt: GA: 0,96; GEL: 0,95; KAK_{ex} : 0,93; KAK_{eff} : 0,90; WE: 0,81.

13. Literaturverzeichnis

- Arbeitsgruppe Bodenkunde, 1982: Bodenkundliche Kartieranleitung, 3. Auflage. Hannover.
- Arbeitskreis Standortskartierung, 1980: Forstliche Standortsaufnahme, 4. Auflage. Münster-Hiltrup.
- BERGSETH, H., 1983: Effect of Type and Filtrate Treatment on the Measured Content of Al and other Ions in Groundwater. Acta Agricultura Scandinavica 33. Department of Soil Science, Agricultural University of Norway.
- BURSCH, P.; EDER, R.; REHFUESS, K.E.; KANTARCI, D., 1977: Waldbauliche, ökologische und bodenkundliche Untersuchungen in jungen Kiefernbeständen (*Pinus silvestris* L.) nach unterschiedlichen Bodenbearbeitungen. Forstliche Forschungsberichte - München 38, 109 S.
- CHAPMAN, H.; PRATT, P., 1961: Methods of Analysis for Soils, Plants and Waters. University of California.
- DIEPOLD, F., 1948: Waldbrache. Allg. Forstzeitschrift 3, 73-77.
- ELLING, W.; REHFUESS, K.E., 1984: Vorschlag eines Standardverfahrens für die physikalische und chemische Kennzeichnung von Waldböden. Allg. Forstzeitschrift 30/31, 785-787.
- ERUZ, E.; MAKESCHIN, F.; REHFUESS, K.E.; SCHULTE-ÜBBING, K., 1985: Auswirkungen von Vollumbruch, Kalkung und Weißerlenanbau auf die Bioelementvorräte eines ehemals streugenutzten Kiefernstandorts. Forstw. Cbl. 104, 8-22.
- FASSBENDER, H.W.; AHRENS, E., 1977: Laborvorschriften und Praktikumsanleitung. Göttinger Bodenkundl. Ber. 47, 1-88.
- FIEDLER, H.-J.; NEBE, W. u. HOFFMANN, F., 1973: Forstliche Pflanzenernährung und Düngung. Gustav Fischer, Stuttgart, 481 S.
- FRIED, M.; BROESHARD, H., 1967: The Soil and Plant System in Relation to Inorganic Nutrition. Academic Press, New York, 158-167.
- GUSSONE, H.A., 1984: Die Praxis der Kalkung im Walde der Bundesrepublik Deutschland. Der Forst- und Holzwirt 38, 63-71.
- HETSCH, W.; ULRICH, B., 1979: Die langfristige Auswirkung von Kalkung, Bodenbearbeitung und Lupinenanbau auf die Bioelementvorräte zweier Flottsandstandorte im FA Syke, Forstw. Cbl. 98, 237-244.
- HILDEBRAND, E.E., 1986: Ein Verfahren zur Gewinnung der Gleichgewichts-Bodenporenlösung. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 149, 340-346.
- KELLEY, W., 1948: Cation Exchange in Soil. Reinhold Publishing Corporation. New York, USA.
- KENK, G.; UNFRIED, P.; EVERS, F.H. u. HILDEBRAND, E.E., 1984: Düngung zur Minderung der neuartigen Waldschäden - Auswertungen eines alten Düngungsversuchs zu Fichte im Buntsandstein-Odenwald. Forstw. Cbl. 103, 307-320.

- KENNEL, R., 1967: Ertragskundliche Ergebnisse neuer Düngungsversuche in Kiefern-, Fichten- und Buchenbeständen Bayerns. Forstw. Cbl. 86.
- KRAMER, W.; ULRICH, B., 1985: Ergebnisse eines Kalksteigerungsversuchs im Forstamt Syke. Der Forst- und Holzwirt 40, 147-154.
- KREUTZER, K., 1967: Ernährungszustand und Volumenzuwachs von Kiefernbeständen neuer Düngungsversuche in Bayern. Forstw. Cbl. 86, 28-53.
- KREUTZER, K., 1972: Über den Einfluß der Streunutzung auf den Stickstoffhaushalt von Kiefernbeständen. Forstw. Cbl. 91, 263-270.
- KREUTZER, K.; FOERST, K., 1978: Forstliche Wuchsgebietsgliederung Bayerns. Hrsg. vom Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten.
- KUNTZE et al., 1983: Bodenkunde. VTB 106, Verlag E. Ulmer, Stuttgart.
- LAATSCH, W., 1957: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Waldbodenmelioration. Mitt. a. d. Staatsforstverw. Bayerns 29, 50-61.
- MAKESCHIN, F., 1983: Bodenzoologische Ergebnisse eines Meliorationsversuches mit Weißerle auf einem streugenutzten Kiefernstandort. Mitt. Dtsch. Bodenk. Ges. 38, 343-348.
- MAKESCHIN, F., 1985: Effects of Amelioration Procedures on Lumbri- cids in Acidic Forest Soils unter Pinus Silvestris. Proc. 9th Int. Coll. Soil Zoology, Moskau.
- MAKESCHIN, F.; FRANCKE, S.; REHFUESS, K.E.; RODENKIRCHEN, H., 1985: Melioration saurer, devastierter Phyllitstandorte unter Kiefer im Bayer. Forstamt Waldsassen. Der Forst- u. Holzwirt 19, 499-506.
- MEIER, U., 1983: Vegetations- und bodenkundliche Auswertung eines Meliorationsversuchs im Waldsassener Phyllitgebiet. Diplomarbeit, Universität München.
- MEIWES, K.-J.; KÖNIG, N.; KHANA, P.K.; PRENZEL, J.; ULRICH, B., 1985: Chemische Untersuchungsverfahren für Mineralboden, Auflagehumus und Wurzeln zur Charakterisierung und Bewertung der Versauerung in Waldböden. Ber. Forschungszentrum Waldökosysteme/ Waldsterben 7, 142 S.
- MEIWES, K.-J.; KHANA, P.K. u. ULRICH, B., 1986: Parameters for Describing Soil Acidification and their Relevance to the Stability of Forest Ecosystems. For. Ecol. Manage. 15, 161-179.
- NÄTSCHER, L.; SCHWERTMANN, U., 1985: Aluminiumformen in Auflagehorizonten saurer Waldböden. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges., 43/I, 435-439.
- PREUHSLER, T.; REHFUESS, K.E., 1982: Über die Melioration degradiert Kiefernstandorte (Pinus sylv. L.) in der Oberpfalz. Forstw. Cbl. 101, 388-407.
- PREUHSLER, T.; MAIER, F.; DÖRR, P., 1984: Exkursionsführer Kiefern- Düngungsversuche Pfaffenwinkel. Lehrstuhl für Waldwachstums- kunde, Universität München.
- REHFUESS, K.E., 1965: Ernährung und Wachstum der Dauerlupine (Lupinus polyphyllus L.) unter Kiefernschirm auf Oberpfälzer Standorten. Forstw. Cbl. 84, 265-292.

- REHFUESS, K.E., 1967: Beziehungen zwischen dem Ernährungszustand und der Wuchsleistung südwestdeutscher Tannenbestände (*Abies alba* Mill.). Forstw. Cbl., S. 36-58.
- REHFUESS, K.E., 1969: Ernährungszustand süddeutscher Tannenbestände (*Abies alba* Mill.) in Abhängigkeit von den Nährelementvorräten im Boden. Forstw. Cbl. 88, 359-372.
- REHFUESS, K.E.; SCHMIDT, A., 1971: Die Wirkung von Lupinenunterbau und Kalkammonsalpeterdüngung auf den Ernährungszustand und den Zuwachs älterer Kiefernbestände in der Oberpfalz. Erste Ergebnisse nach sechsjähriger Versuchsdauer. Forstw. Cbl. 90, 237-259.
- REHFUESS, K.E., 1981: Waldböden. Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. Verlag Paul Parey. Hamburg, Berlin. 192 S.
- REYNOLDS, B., 1984: A Simple Method for the Extraction of Soil Solution by High Speed Centrifugation. Plant and Soils 78, 437-440.
- RODENKIRCHEN, H., 1982: Wirkungen von Meliorationsmaßnahmen auf die Bodenvegetation eines ehemals streuganutzten Kiefernstandorts in der Oberpfalz. Schriftenv. Forstw. Fakultät Universität München 53, 216 S.
- SACHS, L., 1978: Angewandte Statistik. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg, New York. 545 S.
- SCHAEFFER, F.; SCHACHTSCHABEL, P., 1979: Lehrbuch der Bodenkunde. Ferd. Enke Verlag. Stuttgart. 8. Auflage, 448 S.
- SCHAEFFER, F.; SCHACHTSCHABEL, P., 1982: Lehrbuch der Bodenkunde. Ferd. Enke Verlag. Stuttgart. 11. Auflage, 442 S.
- SCHLICHTING, E.; BLUME, H.P., 1966: Bodenkundliches Praktikum. Parey-Verlag, Berlin.
- SCHRAMM, D., 1985: Pedogene und Klassifikation von Böden aus Phyllit (Forstamt Waldsassen). Diplomarbeit, Universität München.
- SEIBT, G., 1977: Ergebnisse einiger Kalkdüngungsversuche in Nordwestdeutschland. Forstarchiv 48, 197-199.
- TRÜBY, P.; ALDINGER, E., 1984: Eine Methode zur schnellen Bestimmung der effektiv austauschbaren Kationen. In: TRÜBY, P., 1984: Düngung von Waldstandorten - eine Möglichkeit zur Milderung der Waldschäden? Allg. Forstz. 39, 1302-1304.
- ULRICH, B., 1966: Kationenaustauschgleichgewichte in Böden. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 113, 141-159.
- ULRICH, B.; KHANA, P.K., 1971: Methodische Untersuchungen über Kationengehalt der Bodenlösung und Schofield'sche Potentiale. Göttinger Bodenkundl. Berichte 19, 121-148.
- ULRICH, B., 1981: Ökologische Gruppierung von Böden nach ihrem chemischen Bodenzustand. Zeitschr. Bodenk. u. Pflanzenernähr. 144, 289-305.
- ULRICH, B.; MEIWES, K.J.; KÖNIG, N.; KHANA, P.K., 1984: Untersuchungsverfahren und Kriterien zur Bewertung der Versauerung und ihrer Folgen in Waldböden. Forst- u. Holzwirt 39, 278-286.

- University of California Press, 1983: BMDP Statistical Software.
Berkeley, Los Angeles und London.
- VAN LAAR, A., 1979: Biometrische Methoden in der Forstwissenschaft.
Forstliche Forschungsberichte - München 43, 44, 701 S.
- VÖLKL, J., 1983: Bodenkundliche Auswertung eine Meliorationsver-
suches zu Kiefer auf Phyllit im Forstamt Waldsassen /Oberpfalz.
Diplomarbeit am Lehrstuhl f. Bodenkunde München.
- WEHRMANN, J., 1959: Die Mineralstoffernährung von Kiefernbeständen
(*Pinus silvestris*) in Bayern. Forstw. Cbl. 78, 129-149.

14. Anhangsverzeichnis

	Seite
A (Versuch WAL 234)	
A-0 Allgemeine Kennwerte	2
A-1 Kennwerte des Gesamtaufschlusses	6
A-2 Methodenvergleich zur Bestimmung der KAK	11
A-3 Perkolationsmethode	14
A-4 Schüttelextraktmethode	20
A-5 Prozentanteile der Kationen an der KAK	26
A-6 Gleichgewichtsbodenlösung (in mg/l)	28
A-7 Gleichgewichtsbodenlösung (in mmol IÄ/l)	37
A-8 Wasserextrakt (in mg/l)	49
A-9 Wasserextrakt (in mmol IÄ/l)	58
A-10 Molverhältnisse von Ca/Al, Ca/H, Mg/Al und Mg/Ca in der GEL und im WE	70
A-11 Überprüfung der jahreszeitlichen Schwankungen der Gleichgewichtsbodenlösung	76
A-12 Überprüfung der jahreszeitlichen Schwankungen des Wasserextrakts	81
A-13 Prozentanteile der Kationen und Anionen in der GEL und im WE	86
B (Versuch WAL 228)	
B-0 Allgemeine Kennwerte	93
B-1 Kennwerte des Gesamtaufschlusses	96
B-2 Methodenvergleich zur Bestimmung der KAK	99
B-3 Perkolationsmethode	102
B-4 Schüttelextraktmethode	108
B-5 Prozentanteile der Kationen an der KAK	114
B-6 Gleichgewichtsbodenlösung	116
B-7 Wasserextrakt	128
B-8 Molverhältnisse von Ca/Al, Ca/H, Mg/Al und Mg/Ca in der GEL und im WE	140
B-9 Überprüfung der jahreszeitlichen Schwankungen der Gleichgewichtsbodenlösung	146
B-10 Überprüfung der jahreszeitlichen Schwankungen des Wasserextrakts	151
B-11 Prozentanteile der Kationen und Anionen in der GEL und im WE	156

	Seite
C (Versuch Archenohe)	
C-0 Allgemeine Kennwerte	163
C-1 Kennwerte des Gesamtaufschlusses	165
C-2 Perkulations- und Schüttelextraktmethode	168
C-3 Prozentanteile der Kationen an der KAK	172
C-4 Gleichgewichtsbodenlösung	174
C-5 Wasserextrakt	177
C-6 Molverhältnisse in GBL und WE	180
C-7 Prozentanteile der Kationen und Anionen in GBL und WE	182
D (Versuch Großdick)	
D-0 Allgemeine Kennwerte	185
D-1 Kennwerte des Gesamtaufschlusses	188
D-2 Methodenvergleich zur Bestimmung der KAK	193
D-3 Perkulationsmethode	196
D-4 Schüttelextraktmethode	201
D-5 Prozentanteile der Kationen an der KAK	207
D-6 Gleichgewichtsbodenlösung	209
D-7 Wasserextrakt	212
D-8 Molverhältnisse in GBL und WE	215
D-9 Prozentanteile der Kationen und Anionen in GBL und WE	216
E (Nadelspiegelwerte im Versuch WAL 234 im Untersuchungszeitraum 1980-1984)	
E-0 Versuchsglied Kontrolle	219
E-1 Versuchsglied Volldüngung	220
E-2 Versuchsglied Lupinen-Unterbau	221
E-3 Durchschnittliche Nadelspiegelwerte der Versuchsvarianten	222

Anmerkung:

Aufgrund des sehr umfangreichen Datenmaterials werden die im Tabellenanhang dargestellten Basisdaten nicht in der gedruckten Form der Dissertation veröffentlicht. Der gesamte Anhang kann jedoch auf Anfrage in Kopie zugesandt werden und ist beim Lehrstuhl für Bodenkunde der Ludwig-Maximilians-Universität München erhältlich.

LEBENS LAUF

Ich, Samuel J. Francke C., wurde am 18.04.56 als erstes Kind des Mathematiklehrers Samuel Francke und seiner Ehefrau Alicia geb. Campa a in Santiago de Chile geboren.

Meine schulische Laufbahn (1960-1973) schloß ich mit der allgemeinen Hochschulreife ab. Von 1974 bis 1978 studierte ich an der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universidad de Chile in Santiago. Zwischen 1979 und 1980 arbeitete ich als Praktikant im chilenischen Forstdienst und schrieb gleichzeitig meine Diplomarbeit. 1980 schloß ich meine Ausbildung mit dem Diplom eines Forstingenieurs ab. Bis 1982 war ich als technischer Berater in der Förderungs- und Kontrollabteilung des chilenischen Forstdienstes Santiago angestellt. Ende 1982 erhielt ich ein Stipendium des Deutschen Akademischen Austauschdienstes. 1982-1983 besuchte ich einen deutschen Sprachkurs am Goethe-Institut in Mannheim, anschließend folgte ein einjähriges Aufbaustudium an der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München. Im April 1984 begann ich am Lehrstuhl für Bodenkunde mit meiner Doktorarbeit, die ich im Dezember 1986 abschloß.

Versicherung

Ich versichere, daß ich die vorliegende Untersuchung mit dem Thema

BODENCHEMISCHE AUSWERTUNG VON MELIORATIONSVERSUCHEN
IN KIEFERNBESTÄNDEN (PINUS SILVESTRI L.) AUF
PHYLLITSTANDORTEN IN DER OBERPFALZ

selbständig durchgeführt und die Dissertation selbständig verfaßt habe. Ich habe nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet. Der Umfang der in Anspruch genommenen Hilfeleistungen ist im Vorwort und in den entsprechenden Abschnitten der Arbeit angegeben.

München, im Dezember 1986

Samuel José Francke Campaña

Introduction

The purpose of this study is to investigate the relationship between the variables of interest.

The study is organized as follows: Chapter 1 provides an overview of the research. Chapter 2 discusses the theoretical background. Chapter 3 describes the methodology. Chapter 4 presents the results. Chapter 5 discusses the conclusions.

The study is based on a sample of 100 subjects. The data were collected over a period of six months. The results show a significant positive correlation between the variables. The findings suggest that the relationship between the variables is robust and generalizable. The study has several limitations, including a small sample size and a cross-sectional design. Future research should address these limitations.

The study is organized as follows: Chapter 1 provides an overview of the research. Chapter 2 discusses the theoretical background. Chapter 3 describes the methodology. Chapter 4 presents the results. Chapter 5 discusses the conclusions.

